

3.19

Spektrum der Wissenschaft

www.Spektrum.de 3.19

8,50 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

Ultraleichte Dunkle Materie

Axionen sollen gleich zwei der größten Rätsel der Physik lösen

SPRACHE Warum nur der Mensch sie beherrscht

GRAPHEN Wunderstoff sucht Anwendung

PLATTENTEKTONIK Gäbe es ohne sie kein höheres Leben?

4 194058 408508 03


Science for a better life
Wenn Sie das Unheilbare heilen könnten, würden Sie es tun?
Mind. 6.000 Krankheiten werden von einer spezifischen Genmutation verursacht
59 % aller Menschen würden Genom-Editierung gegen lebensbedrohliche Krankheiten einsetzen
CanWeLiveBetter.de
Quelle 1: Genetic Disease Foundation: Know Your Genes, 2010
Quelle 2: A Global Social Media Survey of Attitudes to Human Genome Editing. Cell Stem Cell, 2016
BAYER



EDITORIAL
AUS DRECK WIRD GOLD

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

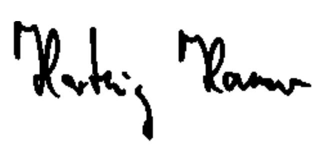
Die beiden stärksten Triebfedern der Wissenschaft sind zum einen der Drang, unsere Welt zu verstehen, sowie zum anderen der Wunsch nach neuen Problemlösungen und Anwendungen. Manchmal geht die Forschung aber auch weniger zielstrebige Wege und wird sozusagen beim Stochern in der Mülltonne zufällig fündig. Gleich drei Beiträge in dieser Ausgabe illustrieren die Einfallskraft von Forschern, die es geschafft haben, zunächst wertlos Erscheinendem oder gar Schädlichem einen Nutzen abzuringen – wenn auch manchmal nur auf Umwegen und nach erheblichen Rückschlägen.

Das erste Beispiel stammt aus der Biomedizin. Der Erreger der gefürchteten Tollwut hat eine charakteristische Fähigkeit, die ihn so tückisch macht: Das Virus arbeitet sich von der Infektionsstelle aus über miteinander verbundene Nervenzellen Schritt für Schritt bis ins Gehirn vor. Genau diese Eigenschaft haben Neuroforscher jetzt genutzt, um aus veränderten und entschärften Tollwutviren ein Werkzeug zu schaffen, mit dem sie genau untersuchen können, wie einzelne Nervenzellen untereinander verknüpft sind (S. 36). Der Tollwuterreger hilft ihnen also, die Funktionsweise des Gehirns besser zu verstehen.

Auch das vor gut eineinhalb Jahrzehnten entdeckte und bald als Wunderstoff gehypte Graphen ist zunächst einmal nichts Besonderes; kleine Stücke davon finden sich sogar in ordinärem Ruß. Für die Industrie interessant werden die einschichtigen Lagen aus Kohlenstoffatomen erst ab einer gewissen Größe. Doch trotz immenser Forschungsanstrengungen und finanzieller Investitionen im Rahmen eines EU-Flaggschiff-Projekts hat sich bisher noch keine der revolutionären Anwendungen für den 2-D-Kohlenstoff gefunden, die man sich anfangs davon versprach. Hier ist inzwischen der wesentliche Erkenntniszuwachs auf einer viel grundlegenderen Ebene zu finden, wie unser Artikel ab S. 50 beschreibt: Heute untersuchen Wissenschaftler eine ganze Reihe weiterer zweidimensionaler Materialien und haben nicht nur viel über diese neue Stoffklasse gelernt, sondern auch einige Substanzen gefunden, die nun als neue, viel versprechende Hoffnungsträger in der angewandten Materialwissenschaft gehandelt werden.

Und sogar im nichtstofflichen Bereich lässt sich aus scheinbar Wertlosem etwas gewinnen. Die Rede ist von visuellen Informationen, die von außerhalb unseres Gesichtsfelds herrühren, aber dennoch – nach Behandlung mit speziellen Algorithmen – überraschend reichhaltige Bilder der Umgebung liefern (S. 58). Ich bin gespannt, welche weiteren Schätze die Forscher künftig in zunächst wenig versprechendem Ausgangsmaterial entdecken werden!

Herzlich, Ihr





NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Biologie – Medizin – Hirnforschung 1.19 eröffnet einen Blick in die faszinierende Welt jener Moleküle, die Leben ermöglichen.

IN DIESER AUSGABE



LESLIE ROSENBERG

Seit mehr als zwei Jahrzehnten fahndet der Physiker nach hypothetischen Teilchen. Ab S. 12 berichtet er von einem Experiment, das bald Klarheit bringen soll.



ANDREW J. MURRAY

Der Neurowissenschaftler untersucht zelluläre Netzwerke im Zentralnervensystem und erforscht, wie sie Informationen verarbeiten. Dabei benutzt er ein ungewöhnliches Hilfsmittel: Tollwutviren (S. 36).


HEIDELBERG LAUREATE FORUM FOUNDATION

MARTIN HELLMAN

Der Erfinder des heute meistverwendeten Verschlüsselungsverfahrens im **Spektrum**-Interview (S. 72).

INHALT



IAN ALLEN PHOTO

12 TITELTHEMA
ULTRALEICHTE TEILCHEN: AUF DER SUCHE NACH AXIONEN



CNRI / SCIENCE PHOTO LIBRARY

36 NEUROLOGIE
TOLLWUTVIRUS ALS WERKZEUG



NUDIBLUE / STOCK.ADOBE.COM

42 GEOLOGIE
LEBENSFREUNDLICHE PLATTENTEKTONIK



STANISLAV CHUB / STOCK.ADOBE.COM

50 GRAPHEN
DIE SELTSAME GESCHICHTE EINES WUNDERSTOFFS



STANFORD COMPUTATIONAL IMAGING LAB; MIT FRDL. GEN. VON GORDON WETZSTEIN, STANFORD UNIVERSITY

58 BILDGEBUNG
UM DIE ECKE GEBLICKT

Titelbild: Feder: Nataba / Getty Images / iStock; Hintergrund: sakkmesterke / Getty Images / iStock; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft



STERNENGEBURT IN DEN MAGELLANSCHEN WOLKEN

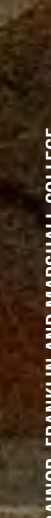
Von der Südhalbkugel aus lassen sie sich mit bloßem Auge erkennen: Die Große und die Kleine Magellansche Wolke. Diese Aufnahme eines Astronomiefotografen zeigt die beiden Zwerggalaxien als helle Nebel während der Dämmerung nahe dem Las Campanas Observatory in Chile. Mit Hilfe des dort installierten du Pont Telescope haben Astrophysiker um David Nidever von der Montana State University nun 3800 rote Riesensterne in diesen Nachbargalaxien der Milchstraße beobachtet. Dank eines Spektro-

RYAN TRAINOR, FRANKLIN AND MARSHALL COLLEGE

grafen namens APOGEE-2S konnten die Forscher die Häufigkeit von Eisen sowie von Elementen aus Helium-Fusionsprozessen ermitteln.

Damit lässt sich rekonstruieren, wie häufig neue Sterne in der Vergangenheit entstanden sind. In den Magellanschen Wolken war dies zunächst deutlich seltener der Fall als in unserer Milchstraße. Erst in den vergangenen zwei Milliarden Jahren schoss die Sternentstehungsrate in die Höhe. Eine mögliche Erklärung: Die beiden benachbarten Satellitengalaxien könnten unabhängig voneinander in einer ruhigen Ecke des Alls entstanden sein. In diesem Fall hätten sie erst in jüngerer Vergangenheit zueinander gefunden, wobei das Gas im interstellaren Medium der Galaxien aufgewirbelt wurde und sich in manchen Regionen zu Sternentstehungsgebieten verdichtet hat.

arXiv 1901.03448, 2019





UNTERKIEFER: CHRISTINA WARINNER, MPI-SHH; BLAUE PARTIKEL: MONICA TROMP, MPI-SHH

Im Unterkiefer einer Frau aus dem Mittelalter (großes Bild) stecken blaue Partikel des Minerals Lapislazuli (kleines Bild).

ARCHÄOLOGIE
ZAHNSTEIN EINER KÜNSTLERIN

Die mittelalterliche Buchkunst ist bekannt für ihre farbenfrohen Illustrationen. Lange gingen die meisten Fachleute davon aus, dass die edelsten und teuersten Manuskripte vor allem von Männern dekoriert wurden. Mittlerweile verdichten sich aber Hinweise, wonach auch Frauen eine wichtige Rolle als Schreiberinnen und Illustratorinnen gespielt haben.

Archäologen um Christina Warinner vom Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena könnten nun eine der frühesten dieser Künstlerinnen identifiziert haben. Darauf deutet zumindest der Zahnstein einer Frau hin, die im 11. oder 12. Jahrhundert auf dem Friedhof eines Frauenklosters in Dalheim bei Paderborn beigesetzt wurde. Das internationale Team fand darin Reste von Lasurit, dem Hauptbestandteil von Lapislazuli.

Der kostbare Schmuckstein kommt nur im heutigen Afghanistan vor, im Mittelalter musste er über die Seidenstraße nach Europa gebracht werden. Damals stellte man aus ihm hauptsächlich das tiefblaue Pigment Ultramarin her, mit dem nur erfahrene und außergewöhnlich fähige Buchmaler religiöse Texte verzieren durften.

Zu dieser Gruppe zählte wohl auch die Dalheimer Klosterfrau. Die Farbpartikel gelangten wahrscheinlich in ihren Mund, als sie beim Illustrieren die Pinselspitze, so wie damals üblich, immer wieder mit Speichel befeuchtete. Schon seit einigen Jahren liefern Untersuchungen von Zahnstein überraschende Einblicke in vergangene Lebensbedingungen. In dem versteinerten Zahnbelag können Spuren von Krankheitserregern und kleinste Nahrungsreste Jahrhunderte überdauern. So zielten auch die Analysen der Bestatteten von Dalheim zunächst darauf ab, den Gesundheitszustand und die Ernährungsgewohnheiten der Klostergemeinschaft zu erforschen. Auf die blauen Minerale stießen die Wissenschaftler dabei eher zufällig.

Science Advances 10.1126/sciadv.aau7126, 2019

MEDIZIN
DAS HERZSTÜCK DER FIEBERABWEHR

Auf Infektionen reagiert unser Körper mit Fieber – aber was bringt ihm das genau? Forscher um Jianfeng Chen vom Shanghai Institute of Biochemistry and Cell Biology haben nun in einer Mäusestudie neue Details zu dieser Frage zu Tage gefördert. Demnach bringt ein bei Fieber freigesetzter Regulator bestimmte Immunzellen dazu, effektiver Infektionsherde zu bekämpfen.

Die Forscher haben sich im Körper von fiebernden und gesunden Mäusen die Lymphozyten genauer angesehen. Die weißen Blutkörperchen wandern zu Infektionsherden und gehen in infiziertem Gewebe und in Lymphknoten gezielt gegen Krankheitserreger vor. Man wusste bereits, dass dies den Lymphozyten bei Fieber besser gelingt als bei normaler Körpertemperatur – der Grund dafür war allerdings noch unklar.

Die Untersuchungen von Chen und Co zeigen nun, dass die erhöhte Temperatur in T-Lymphozyten die Produktion des Hitzeschockproteins Hsp90 aktiviert. Dieses bindet an ein anderes Protein namens α-4-Integrin, das in der Zellmembran der Lymphozyten sitzt. Letzteres sorgt wiederum dafür, dass die weißen Blutkörperchen an Gefäßwände andocken und somit ihre Attacke auf fremde Bakterien starten können. Das an der Basis des Integrins gebundene Hsp90 scheint dabei Ersteres so zu verändern, dass es sein Ziel besser greifen kann. Zudem vernetzen die angehafteten Hitzeschockproteine benachbarte Integrine auf der Oberfläche der Immunzellen. So entstehen dichte Cluster von Zacken, die das Eindringen der Lymphozyten ins Gewebe beschleunigen können.

Insgesamt steigert die erhöhte Körpertemperatur somit die Leistungsfähigkeit der Lymphozyten, argumentieren die Forscher. Dabei reagiert das Herzstück der Fieberabwehr, Hsp90, offenbar sehr exakt auf Temperaturschwankungen. Bei Mäusen bildet es sich fast ausschließlich oberhalb einer Körpertemperatur von 38,5 Grad. Vielleicht wird dadurch sogar erst eine wirklich effektive Abwehr möglich: In einem weiteren Versuch, in dem die Hsp90-Produktion künstlich unterbunden wurde, starben die Versuchstiere schnell an Infektionen.

Immunity 50, S. 137–151, 2019

TEILCHENPHYSIK
WAS KOMMT NACH DEM LHC?

Physiker haben Pläne für einen Nachfolger des Large Hadron Collider (LHC) am Genfer Kernforschungszentrum CERN präsentiert: Der Future Circular Collider (FCC) soll in einem 100 Kilometer langen Kreistunnel unter Genf Platz finden und subatomare Teilchen auf noch höhere Energien beschleunigen als der 27 Kilometer lange LHC. Die neue Maschine könnte um das Jahr 2040 in Betrieb gehen, heißt es in der ausführlichen Konzeptstudie, an der 1300 Wissenschaftler mitgeschrieben haben.

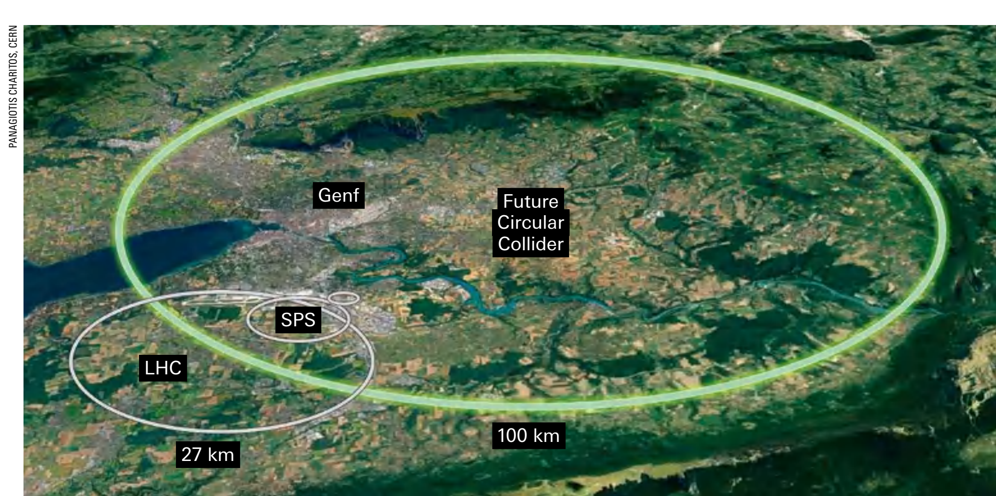
Im Kreistunnel des FCC würden demnach zunächst Elektronen und Positronen mit Energien von bis zu 0,36 Teraelektronvolt (TeV) zusammenstoßen. Damit ließe sich insbesondere das 2012 entdeckte Higgs-Teilchen in größerem Detail als bisher untersuchen. Für Ende der 2050er Jahre sehen die Pläne dann einen Umbau zu einem Protonen-Beschleuniger nach Vorbild des LHC vor. Die Maschine würde Atomkerne mit Energien von 100 TeV zur Kollision bringen, dem Siebenfachen der Maximalenergie des LHC.

Ob die Physiker in diesem Energiebereich wirklich neue subatomare Phänomene entdecken können, ist offen. Die Pläne für den Bau des FCC dürften daher noch für Diskussionen sorgen, auch wegen des anvisierten Preises: So würde der Elektron-Positron-FCC rund neun Milliarden Euro kosten, von denen fünf auf die Tunnelarbeiten entfallen sollen. Die Umrüstung zu einem Protonen-Beschleuniger würde den Schätzungen zufolge weitere 15 Milliarden erfordern.

Der riesige Ringbeschleuniger muss sich auch noch gegen konkurrierende Ideen durchsetzen: So wollen andere Wissenschaftler am CERN lieber ein Gerät namens CLIC bauen, das Elektronen und Positronen auf gerader Strecke beschleunigen würde. Auch eine aufwändige Aufrüstung des LHC zu höheren Energien ist im Gespräch, genauso wie viele Ideen für kleinere Experimente. 2020 will das CERN-Fühungsgremium entscheiden, welche Projekte die europäische Teilchenphysik mit Nachdruck verfolgen soll.

CERN-Pressemitteilung, 15. Januar 2019

Der Kreistunnel des FCC würde westlich des Genfer Sees gegraben werden.



PANAGIOTIS CHARITOS, CERN

ASTRONOMIE
RENDEZVOUS MIT ULTIMA THULE


Der Asteroid Ultima Thule treibt am Rand des Sonnensystems (Schwarz-Weiß-Bild).

NASA / JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY / SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE (HTTP://PLUTO.JHUAPL.EDU/NEWS-CENTER/NEWS-ARTICLE.PHP?PAGE=20190124)

Rund dreieinhalb Jahre nach ihrem Vorbeiflug am Zwergplaneten Pluto hat die NASA-Raumsonde New Horizons erneut einen Himmelskörper am Rand des Sonnensystems fotografiert. Der Asteroid Ultima Thule (so der vorläufige, noch nicht von der Internationalen Astronomischen Union abgesegnete Spitzname) ist derzeit rund 6,6 Milliarden Kilometer von uns entfernt, was dem 44-fachen Abstand Erde–Sonne entspricht.

Auf den Bildern der Sonde erinnert die 30 Kilometer große Welt an einen Schneemann: Sie besteht aus zwei kugelrunden Brocken, die wohl irgendwann einmal mit sehr geringer Geschwindigkeit zusammengestoßen sind und seitdem aneinander haften. New Horizons flog am Neujahrstag 2019 mit einer Relativgeschwindigkeit von 14 Kilometern pro Sekunde an dem Asteroiden vorbei und näherte sich bis auf 3500 Kilometer an. Die NASA-Mission scheint das historische Rendezvous – es ist der erste Vorbeiflug einer Raumsonde an einem derart weit von uns entfernten Himmelsobjekt – gut überstanden zu haben. Sie hat allerdings erst einen kleinen Teil der gesammelten Bilder und Messdaten zur Erde gefunkt. Wegen der geringen Bandbreite von zwei Kilobit pro Sekunde (weniger als Internetmodems in den 1990er Jahren) soll die Übertragung bis zum Herbst 2020 andauern.

Die Messdaten könnten unter anderem die chemische Zusammensetzung der rötlichen Oberfläche von Ultima Thule verraten. Sie gleicht der Färbung von anderen Objekten am Rand des Sonnensystems geht vermutlich auf den Beschuss mit kosmischer Strahlung zurück. Das Material, aus dem Ultima Thule besteht, hat sich ansonsten seit der Entstehung des Sonnensystems vor 4,6 Milliarden Jahren wohl nur wenig verändert, weshalb es Rückschlüsse auf die Kindertage unserer kosmischen Heimat zulassen könnte.

NASA-Pressemitteilungen, 2. und 24. Januar 2019

UMWELT
FEINSTAUBBEKÄMPFUNG MIT NEBENWIRKUNGEN

Drastische Maßnahmen gegen die Feinstaubbelastung in chinesischen Großstädten haben eine unvorhergesehene Nebenwirkung: Die Belastung mit Ozon ist in den Sommermonaten deutlich gestiegen, seit Chinas offizieller Aktionsplan gegen Luftverschmutzung 2013 in Kraft getreten ist.

Das berichtet eine Arbeitsgruppe um Ke Li von der Nanjing University of Information Science and Technology. Sie hat zwischen 2013 und 2017 Daten von etwa 1000 Messstationen in den Ballungszentren rund um Peking, Schanghai, Chengdu und Guangzhou ausgewertet. Hier ging die Belastung mit Feinstaubpartikeln mit weniger als 2,5 Mikrometern Durchmesser um bis zu 40 Prozent zurück. Gleichzeitig stiegen die Ozonkonzentrationen jährlich um ein bis sechs Mikrogramm pro Kubikmeter Luft. Ursache könnte die veränderte Atmosphärenchemie sein, argumentieren die Forscher: Feinstaubpartikel fangen das Sauerstoffradikal HO_2 ab, das eine Zwischenstufe bei der Bildung von Ozon ist. Je weiter die Feinstaubkonzentration sinkt, desto mehr Radikale stehen dafür zur Verfügung.

Die Ozonbelastung ist in Ostchina ein erhebliches Problem. Die Konzentrationen liegen im Sommer teilweise deutlich über dem vorgegebenen Höchstwert von 160 Mikrogramm Ozon pro Kubikmeter Luft.

Die Fachleute betonen, dass das Problem keineswegs die sinkenden Feinstaubkonzentrationen sind. Der Ausstoß dieser Partikel müsste weiter gesenkt werden. Zusätzlich dazu fordern die Wissenschaftler einen stärkeren Fokus auf die eigentliche Ursache der Ozonbelastung: einerseits Stickoxide, andererseits flüchtige organische Verbindungen. Beide stammen überwiegend aus Verbrennungsmotoren und erzeugen unter UV-Licht über komplizierte Reaktionsketten Ozon.

PNAS 8, S. 422–427, 2019

BIOLOGIE
AAS FRESSENDE HASEN

Im harschen kanadischen Winter legen Schneeschuhhasen ein Verhalten an den Tag, das so gar nicht zu ihrem kuscheligem Image passt: Wenn Frost und Schnee den Zugang zu pflanzlicher Kost einschränken, fressen die Tiere, was sie bekommen können. Dazu zählen auch die Überreste anderer Tierarten, wie Michael Peers von der University of Alberta mit seinem Team nun dokumentiert hat.

Unter anderem mit Hilfe von Kamerafallen wiesen die Biologen nach, dass die Hasen in einem Teil des kanadischen Yukon-Territoriums regelmäßig Aas fressen. Die Bilder zeigten verschiedene Schneeschuhhasen *(Lepus americanus)*, die im tiefen Winter an den Kadavern von Artgenossen, Raufußhühnern, Tauchern (eine Vogelfamilie) und sogar an den Überresten eines Luchses nagten – Letzterer gehört zu den wichtigsten Fressfeinden der Hasen.

Vor diesen Aufnahmen existierten nur anekdotische Hinweise auf das ungewöhnliche Verhalten. Jetzt aber besteht aus Sicht der Forscher kein Zweifel mehr: Von rund 160 beobachteten Kadavern wurden mindestens 20 von den Hasen besucht und angeknabbert, wobei die Überreste von Raufußhühnern am beliebtesten waren. Besonders begehrt neben dem Fleisch waren die Federn der Tiere, die womöglich bei der Verdauung helfen.

Am häufigsten beobachteten die Wissenschaftler den Aaskonsum zwischen November und Februar; im Frühjahr wurde kein einziger Hase an totem Fleisch fotografiert. Im Winter herrscht in der Region Dauerfrost, und es liegt oft Schnee, was den Zugang zu Pflanzennahrung erschwert. Fleisch weist zudem einen höheren Nährwert auf und liefert damit mehr Energie während der kräftezehrenden Wintermonate.

Northwest. Nat. 99, S. 232–236, 2018



Schneeschuhhasen verändern im Winter ihre Diät.

SEVENTHDAYPHOTOGRAPHY / GETTY IMAGES / ISTOCK

KERNPHYSIK
RADIOAKTIVER EXOT ALS NEUTRONENFÄNGER

Ein seltenes radioaktives Isotop sorgt für eine Überraschung unter Kernphysikern: Zirconium-88 absorbiert 80 000-mal bereitwilliger Neutronen als theoretische Vorhersage nahelegen, berichtet ein Team um Jennifer Shusterman vom US-amerikanischen Lawrence Livermore National Laboratory.

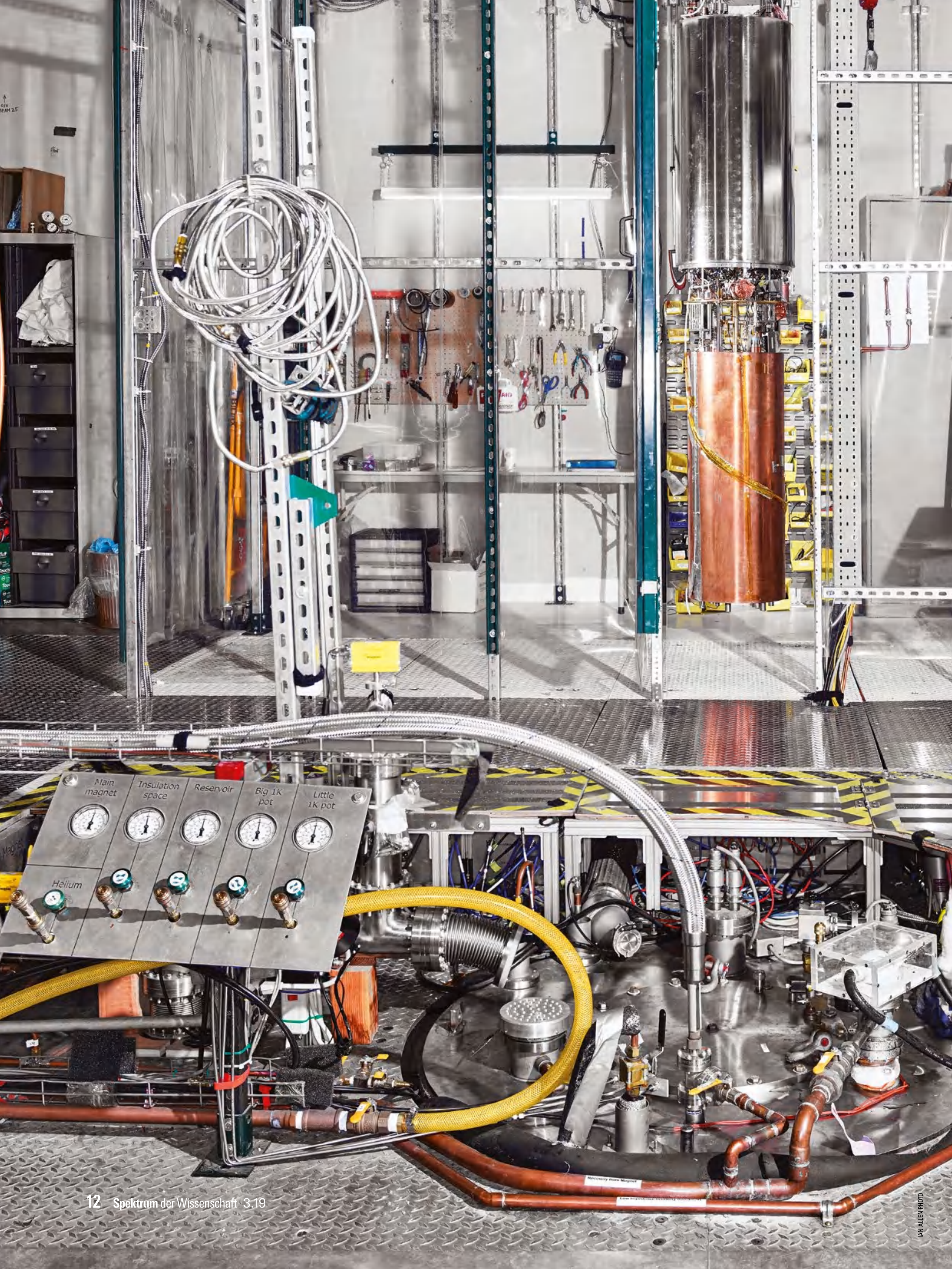
Insgesamt handele es sich um den zweitgrößten je gemessenen »Wirkungsquerschnitt« für thermische Neutronen, also solche mit eher mäßig hoher Bewegungsenergie. Nur das Isotop Xenon-135 absorbiert die ungeladenen Teilchen noch bereitwilliger.

Normalerweise stecken Neutronen zusammen mit Protonen in Atomkernen. Bei radioaktiven Zerfällen können sie Letztere jedoch verlassen und anschließend beispielsweise Uranatomkerne spalten, was weitere Neutronen freigesetzt. Auf dieser nuklearen Kettenreaktion basieren Kernkraftwerke und Atomwaffen.

Shusterman und ihr Team setzten Döschen mit pulverförmigem, unter großem Aufwand hergestellten Zirconium-88 dem Neutronenstrahl aus einem Kernreaktor aus. Dabei wandelten sich viele der Atomkerne durch Neutroneneinfang in Zirconium-89 um. Da dieses genauso wie Zirconium-88 instabil ist, ließ sich aus der Stärke der jeweils charakteristischen Zerfallssignale der Wirkungsquerschnitt bestimmen.

Wie bei Xenon-135 ist bei Zirconium-88 noch unklar, weshalb es so gerne Neutronen einfängt. Denkbar ist, dass beiden Isotopen gemäß dem Schalenmodell der Kernphysik nur noch ein beziehungsweise zwei Neutronen fehlen, um eine Schale zu vervollständigen. Das könnte es für die Atomkerne besonders attraktiv machen, die Teilchen einzufangen. Dazu passt jedoch nicht das ebenfalls sehr neutronenaffine Gadolinium-157, das weit von einer geschlossenen Schalenkonfiguration entfernt ist. Die Autoren der aktuellen Studie halten jedenfalls weitere Überraschungen für denkbar: In den kommenden Jahren sollen mehrere Experimente Neutronen und ihre Wechselwirkung mit radioaktiven Atomkernen noch genauer erforschen.

Nature 565, S. 328–330, 2019



IAN ALLEN PHOTO

PHYSIK

EINE FALLE FÜR AXIONEN

Der Großteil der Materie des Weltalls ist unsichtbar. Als Erklärung dafür vermuten einige Forscher äußerst massearme Teilchen – die zudem noch ein weiteres physikalisches Rätsel lösen könnten. Ein ambitioniertes Experiment sucht nach ihnen und befindet sich nun in der entscheidenden Phase.



Leslie Rosenberg ist Professor für Physik an der University of Washington und seit mehr als zwei Jahrzehnten auf der Jagd nach Axionen.

spektrum.de/artikel/1621150

Das zylindrische Innenleben des Dunkle-Materie-Detektors ADMX befindet sich im Bildhintergrund. Für Messungen wird es in ein Loch gesenkt (unter dem Deckel im Vordergrund).

IAN ALLEN PHOTO

Der Kosmos besteht zum Großteil aus einem unsichtbaren Stoff. Bereits in den 1930er Jahren sind Astronomen zu dem Schluss gekommen, dass Galaxienhaufen auseinanderfliegen müssten, hielte sie nicht irgendeine Art unsichtbarer »Dunkler Materie« zusammen. In den 1970er Jahren begannen Wissenschaftler, sich ernsthafter mit der Idee auseinanderzusetzen. Denn zu dieser Zeit ergaben Untersuchungen der Rotation von Galaxien den gleichen Befund. Inzwischen scheint die Erkenntnis unausweichlich: Der weitaus größte Teil der stofflichen Substanz des Universums, die der Schwerkraft ausgesetzt ist, muss aus einer unbekannten Materieform bestehen. Das könnten etwa Elementarteilchen sein, die vom Urknall übrig geblieben sind und sich noch in keinem Experiment gezeigt haben.

Lange Zeit galten schwach wechselwirkende und massereiche Teilchen (WIMPs, englisch: weakly interacting massive particles) als die besten Kandidaten dafür. Denn sie passten in die beliebte, wenn auch spekulative Theorie der Supersymmetrie, nach der jedes der bekannten Teilchen einen noch unentdeckten Partner hat. Doch trotz jahrzehntelanger Suche in zahlreichen Laboren auf der Erde ist in keinem der empfindlichen Detektoren ein WIMP aufgetaucht. Es mag zwar zu früh sein, um den Ansatz völlig aus dem Rennen zu nehmen, doch das Ausbleiben von Erfolgen hat die Aufmerksamkeit verstärkt auf alternative Erklärungen für die Dunkle Materie gelenkt.

Ein solcher, weniger bekannter Kandidat ist das Axion. Das hypothetische Teilchen besitzt eine wesentlich geringere Masse als WIMPs, interagiert aber ebenfalls kaum mit gewöhnlicher Materie. Wenn Dunkle Materie aus Axionen besteht, müssten diese Teilchen entsprechend zahlreich vorkommen: In jedem Kubikzentimeter um uns herum müssten sich dutzende oder sogar hunderte Billionen Axionen befinden. Das Universum würde ihre Anwesenheit nur über die Gravitationskraft der Teilchen spüren, die sich auf großen räumlichen Abständen aufsummiert und die Galaxien und Galaxienhaufen zusammenhält.

AUF EINEN BLICK
SCHLAGKRÄFTIGE FLIEGENGEWICHTE

1. In den 1970er Jahren haben Theoretiker eine extrem leichte Teilchensorte ersonnen – ursprünglich, um ein Symmetrieproblem bei subatomaren Wechselwirkungen zu lösen.

2. Diese hypothetischen Axionen könnten obendrein eine der größten kosmologischen Fragen beantworten, nämlich in welcher Form sich ein Großteil der Materie des Weltalls versteckt.

3. Mit dem Axion Dark Matter Experiment ADMX suchen Forscher nach den Objekten. Dank technischer Verbesserungen hoffen sie, bald fündig zu werden oder aber die plausibelsten Szenarien zu widerlegen.

Seit mehr als 20 Jahren arbeite ich mit Kollegen an einem speziellen Detektor dafür. Bislang haben wir mit dem Axion Dark Matter Experiment (ADMX) nichts gefunden. Doch 2016 hat eine neue Phase des technisch verbesserten Geräts begonnen. Es ist seither so empfindlich, dass es innerhalb der kommenden fünf bis zehn Jahre entweder Axionen aufspüren wird oder ihre Existenz widerlegt – jedenfalls der plausibelsten Versionen dieser Teilchen.

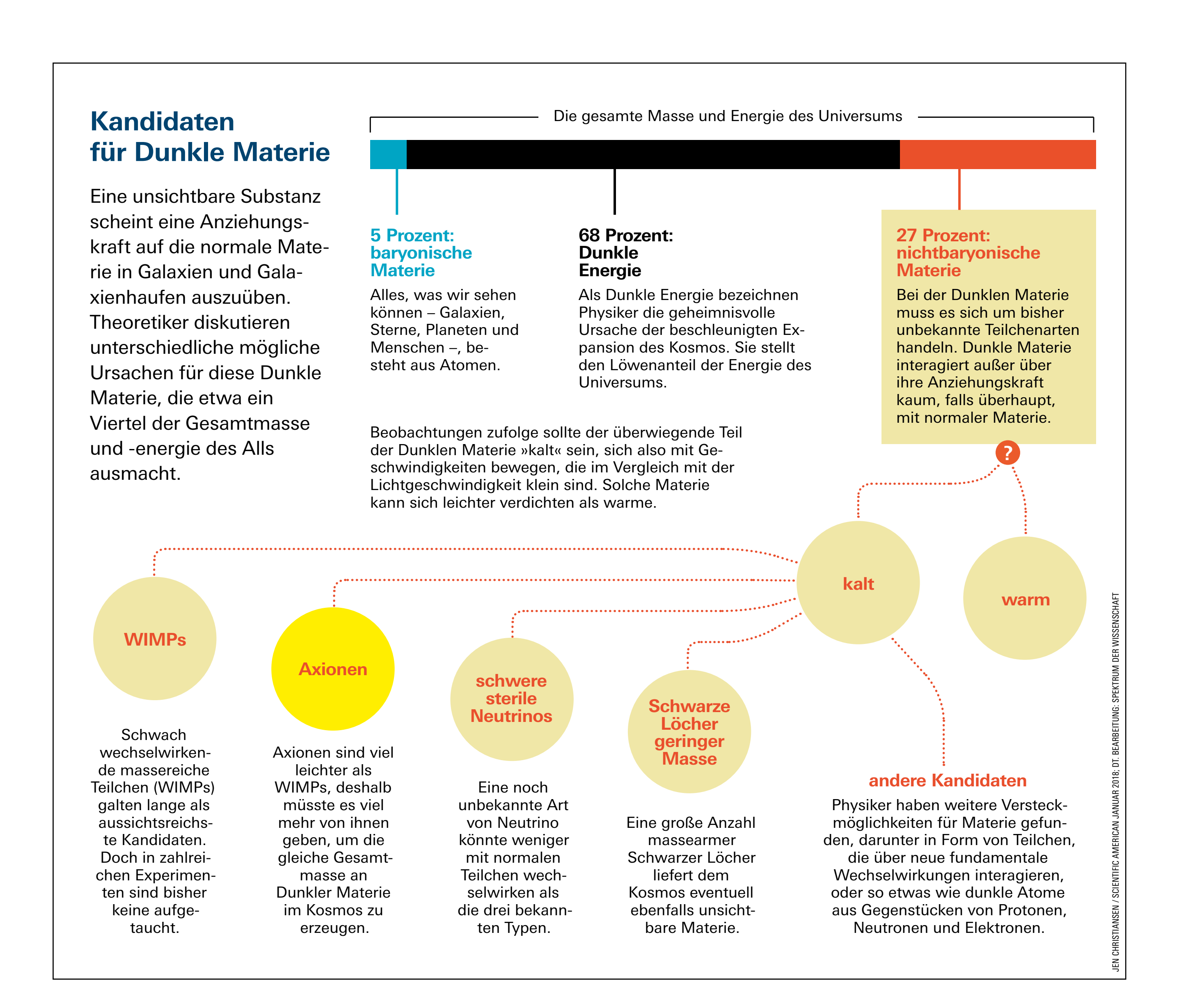
Axionen tauchten Ende der 1970er Jahre erstmals als Lösung eines Problems aus der so genannten Quantenchromodynamik (QCD) auf. Die Theorie beschreibt die starke Wechselwirkung, welche die Atomkerne zusammenhält. Die QCD stimmt bemerkenswert gut mit verschiedensten experimentellen Ergebnissen überein – bis auf das »starke CP-Problem«. C steht hier für Ladung und P für Parität, das heißt das Verhalten unter räumlicher Spiegelung. Die QCD sagt voraus, dass bei einer gleichzeitigen Umkehrung von Ladung und Parität die Teilchen in einem Experiment nicht mehr denselben physikalischen Regeln folgen würden. Doch die Forscher fanden in der Realität keinerlei Hinweise auf ein solches Verhalten. Diese Diskrepanz ist bis heute eine ernst zu nehmende Wissenslücke im Modell der Teilchenphysik und zeigt: Wir übersehen etwas Wichtiges.

Das Ende einer Symmetrie weckte Hoffnungen auf ein neues Teilchen

1977 erkannten Helen Quinn und Roberto Peccei, die damals am Stanford Institute for Theoretical Physics in Kalifornien tätig waren, wie sich das starke CP-Problem einfach und elegant auf Grundlage einer gebrochenen Symmetrie lösen lässt. Das ist ein in der Physik häufig verwendetes Konzept. Stellt man einen Bleistift auf seine Spitze, kann er in alle Richtungen umfallen. Man sagt auch, es besteht eine Rotationssymmetrie. Was aber, wenn er stets zur selben Seite fällt? Dann würden wir sagen, die Natur hat offenbar eine Wahl getroffen, und wir brauchen einen Auslöser, der den Vorgang erklärt. Passiert so etwas in der Teilchenphysik, dann lassen sich die fundamentalen Gesetze trotz oberflächlich gebrochener Symmetrie mit Hilfe eines neuen Teilchens retten. Dabei muss das Geschehen nicht so offensichtlich sein wie bei einem Bleistift, es kann sich ebenso um eine abstrakte Symmetrie der zu Grunde liegenden Mathematik handeln.

Quinn und Peccei haben die Idee auf die starke Wechselwirkung angewendet. Sie spekulierten, eine mit dieser Kraft zusammenhängende, versteckte Symmetrie sei gebrochen. Wenn das der Fall wäre, würde es erklären, warum sich die von der Theorie vorhergesagte CP-Differenz nicht in Experimenten zeigt. Schon bald darauf erkannten Steven Weinberg, der jetzt an der University of Texas in Austin tätig ist, und Frank Wilczek, inzwischen am Massachusetts Institute of Technology, dass der Peccei-Quinn-Mechanismus die Existenz eines neuen Teilchens erfordert. Das Axion war geboren.

Bis Mitte der 1980er Jahre kamen Physiker außerdem zu dem Schluss, beim Urknall könnten genug Axionen entstanden sein, um die Dunkle Materie zu erklären. Doch die Theorie machte keine Aussage darüber, wie schwer Axionen sein müssten und wie stark sie mit normaler



Materie in Wechselwirkung treten würden. Da Teilchenbeschleuniger und andere Experimente bislang keine Axionen gezeigt haben, dürften diese kaum mit normaler Materie interagieren und müssten eine vergleichsweise geringe Masse haben. 1987 schränkte ein kosmisches Ereignis die Palette der Möglichkeiten weiter ein. Damals kam es zu einer Supernova in der Großen Magellanschen Wolke, einer nahe gelegenen Zwerggalaxie. Die Explosion eines Sterns schleuderte eine enorme Menge Neutrinos ins All, von denen einige in unterirdischen Detektoren auf der Erde auftauchten. Wenn es Axionen gibt, wären auch sie bei den enorm energiereichen Prozessen entstanden. Je nachdem, welche Eigenschaften sie besäßen, hätte sich das auf den Verlauf der Supernova ausgewirkt und den Zeitpunkt des Neutrinoausbruchs beeinflusst. Da die Beobachtungen keine derartigen Effekte zeigten, kann ein Axion bloß eine Masse von weniger als ein paar Millielektronvolt haben (eine in der Teilchenphysik übliche Einheit, so beträgt die Ruhemasse des Elektrons 511 Kiloelektronvolt). Derart leichte Axionen würden nur extrem schwach mit normaler Materie und Strahlung wechselwirken.

Während beispielsweise ein recht gewöhnliches Teilchen wie das neutrale Pion mit einer Halbwertszeit von 10^{-16} Sekunden in Photonen zerfällt, dauerte der Vorgang beim Axion 10^{45} Jahre. Das übertrifft das Alter des Universums um viele Größenordnungen.

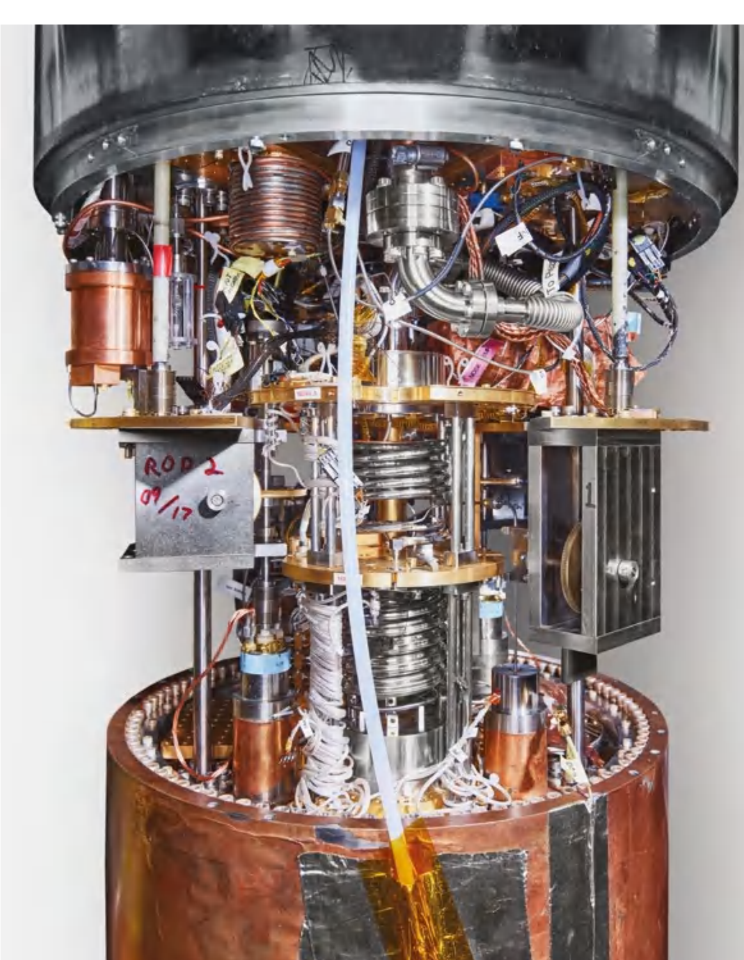
Falls die Masse des Axions jedoch zu klein ist, steht das Konzept vor anderen Problemen. Auf Grund der Feinheiten des Prozesses, über den bei der Geburt des Kosmos die Axionen entstanden wären, ergibt sich eine umso größere Dichte, je geringer die Masse dieser Teilchen ist. Bei einer zu kleinen Masse der einzelnen Axionen hätten sich beim Urknall mehr von ihnen gebildet, als zur Erklärung der Dunklen Materie nötig sind. Zwar gibt es erhebliche Unsicherheiten, und Theoretiker haben sich einige Tricks einfallen lassen, um das Problem zu umschiffen. Doch mir persönlich erscheinen Axionen mit einer Masse von unter einem Mikroelektronvolt immer weniger plausibel.

Einerseits sind Axionen also nicht allzu massereich, sonst hätten wir sie in Teilchenbeschleunigern oder durch ihren Einfluss auf Supernovae bereits gesehen. Andererseits darf ihre Masse nicht zu klein sein, sonst gäbe es zu

IAN ALLEN PHOTO

Ingenieure bringen Sensoren im Inneren des Experiments an (oben). Oberhalb des kupferbeschichteten Hohlraums befindet sich ein Reservoir aus flüssigem Helium, das die Elektronik umgibt (rechts).

IAN ALLEN PHOTO



viel Dunkle Materie. Die beiden Grenzen lassen sich nicht exakt ziehen, doch vernünftige Annahmen führen zu einem erlaubten Bereich von etwa einem Mikro- bis zu einem Millielektronvolt.

Als Quinn und Peccei erstmals die Existenz von Axionen ins Spiel brachten, begannen die Physiker in Stanford und an anderen Forschungszentren sofort mit der Suche. Doch gerade die Eigenschaften, die Axionen zu attraktiven Kandidaten für die Dunkle Materie machen, nämlich ihre geringe Wechselwirkung mit normaler Materie und Strahlung, ließ zugleich das Vorhaben hoffnungslos erscheinen, sie in Teilchenbeschleunigern zu produzieren und nachzuweisen. Pierre Sikivie von der University of Florida schlug darum 1983 vor, stattdessen direkt nach den unzähligen kosmischen Exemplaren zu suchen, die uns in Form der Dunklen Materie bereits umgeben sollten. Sikivie stellte sich ein magnetisches Feld in einem zylinderförmigen Hohlraum vor, der komplett leer sein sollte – bis auf die angenommenen Axionen. Wenn ein solches Teilchen in einem seltenen Fall mit dem magnetischen Feld in Wechselwirkung träte,

würde seine Energie nahezu vollständig in ein Photon konvertiert. Dazu käme es vor allem dann, wenn der Hohlraum ein Resonanzkörper für die aus den Axionen entstehenden Photonen wäre: Axionen können sich in zwei Photonen umwandeln. Das Magnetfeld stellt im Hohlraum »virtuelle Photonen« zur Verfügung. Dann geht aus dem Zerfallsprozess nur noch ein Photon hervor, und das andere wird gewissermaßen durch das virtuelle ersetzt (siehe kleine Grafik in »Die Hardware«, unten). Mit der Stärke des Magnetfelds steigt die Wahrscheinlichkeit für den Vorgang.

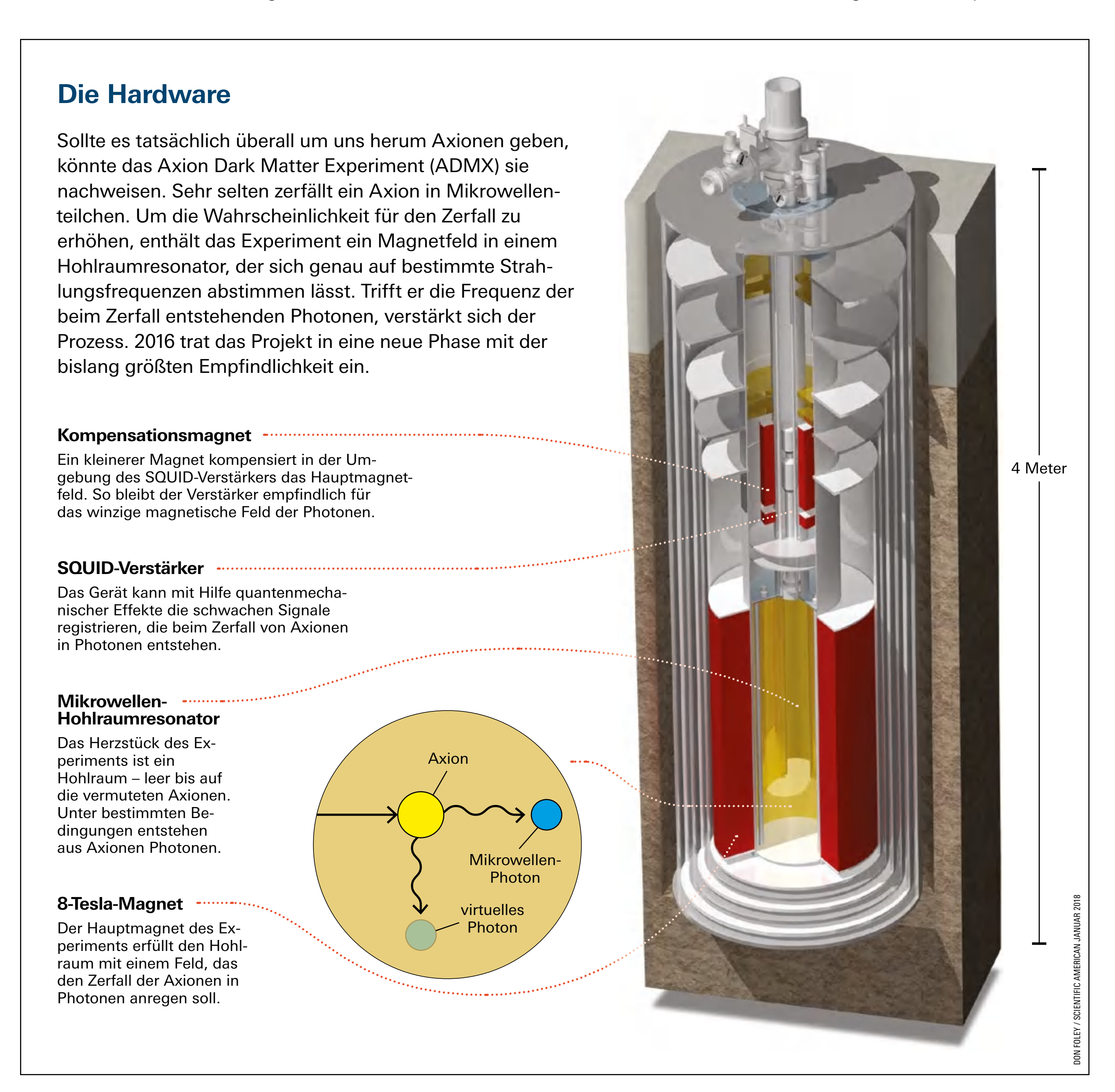
Da die Masse der hypothetischen Axionen sehr klein ist und sich die Teilchen in unserer kosmischen Umgebung vermutlich etwa mit derselben Geschwindigkeit bewegen wie der Rest der Milchstraße, wäre ihre Energie winzig. Entsprechend hätten die erzeugten Photonen eine Frequenz im Mikrowellenbereich. Der genaue Wert bliebe uns allerdings unbekannt, solange wir die genaue Masse der Axionen nicht kennen. Experimentatoren müssten also die Resonanzfrequenz des Hohlraums verändern, um den in Frage kommenden Bereich abzuscannen, in der Hoffnung, irgendwo auf ein Signal der Axionen zu stoßen.

Das Signal wäre mit 10^{-21} Watt oder weniger sehr schwach und etwa von der gleichen Größenordnung wie das unvermeidliche Rauschen. Doch extrem empfindliche Mikrowellendetektoren, die über eine ausreichend lange Zeit messen, sollten es nachweisen können. Da ich mich sowohl für Radioelektronik als auch für Teilchenphysik begeistere, fand ich Sikivies Idee großartig.

Bei meiner Doktorarbeit in den 1980er Jahren arbeitete ich in Stanford. Dort war der Einfluss von Quinn und Peccei noch zu spüren, und die Axionen machten einen großen Eindruck auf mich. Sie schienen gleich zwei Mysterien der

Die Hardware

Sollte es tatsächlich überall um uns herum Axionen geben, könnte das Axion Dark Matter Experiment (ADMX) sie nachweisen. Sehr selten zerfällt ein Axion in Mikrowellenteilchen. Um die Wahrscheinlichkeit für den Zerfall zu erhöhen, enthält das Experiment ein Magnetfeld in einem Hohlraumresonator, der sich genau auf bestimmte Strahlungsfrequenzen abstimmen lässt. Trifft er die Frequenz der beim Zerfall entstehenden Photonen, verstärkt sich der Prozess. 2016 trat das Projekt in eine neue Phase mit der bislang größten Empfindlichkeit ein.



DON FOLEY / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2018

Physik zu lösen: das starke CP-Problem und das Rätsel der Dunklen Materie. Und die Idee von Sikivie zeigte einen Weg auf, sie zu entdecken.

Später ging ich an die University of Chicago, wo ich das Privileg hatte, als Enrico Fermi Fellow unter dem inzwischen verstorbenen Nobelpreisträger James Cronin zu arbeiten. Dort erfuhr ich von den ersten Versuchen, Sikivies Ansatz in die Praxis umzusetzen, darunter das Rochester-Brookhaven-Fermilab-Experiment und ein Projekt an der University of Florida. Die Empfindlichkeit beider Aufbauten war noch zu gering, um Axionen im plausiblen Massenbereich aufzuspüren. Aber die Arbeit an den Geräten trug zur Entwicklung der grundlegenden Hardware für alle nachfolgenden Ansätze bei.

Eine Vision wird Wirklichkeit

Während meiner Zeit in Chicago kam ich in Kontakt mit Karl van Bibber, damals am Lawrence Livermore National Laboratory, und David Tanner von der University of Florida. Wir sammelten Ideen für Optimierungen. So brächte ein großer Hohlraum mit einem starken Magnetfeld das Experiment bereits in die Nähe der angestrebten Empfindlichkeit. Um den Rest auch noch zu schaffen, würden wir bessere Mikrowellenverstärker benötigen. Sie waren der Schlüssel zum Ziel, das extrem schwache Signal der Axionen aufzufangen. Doch die damals verfügbaren Verstärker auf Transistorbasis erzeugten ein viel zu starkes Rauschen. Wir wünschten uns ein Bauteil, das nur durch das prinzipiell unabwendbare quantenmechanische Rauschen begrenzt ist. Leider gab es so etwas für unseren Frequenzbereich nicht.

Wir starteten das ADMX-Projekt mit dem Besten, was wir hatten: einem starken Magneten, dem leistungsfähigsten erhältlichen Mikrowellenverstärker und flüssigem Helium. Damit kühlten wir das Experiment auf 4,2 Kelvin, wenige Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt, um das Rauschen möglichst zu mindern. Auf mittlere Sicht zielten wir auf die Entwicklung eines quantenlimitierten Verstärkers ab. Langfristig wollten wir einen Verdünnungskryostaten hinzufügen, ein System, das Hohlraum und Verstärker auf Temperaturen um 100 Millikelvin abkühlt und so noch einmal das Rauschen verringert. Das Vorhaben war ambitioniert – jede Phase würde etwa ein Jahrzehnt in Anspruch nehmen. Glücklicherweise fanden wir Unterstützung bei der Abteilung für Hochenergiephysik des US-Energieministeriums.

1993 ging ich als Dozent an das Massachusetts Institute of Technology (MIT), und wir begannen, unsere Vision umzusetzen. Im Rahmen einer Zusammenarbeit unserer Hochschulen stellte das Lawrence Livermore Lab einen großen supraleitenden Magneten und außerdem den Standort für das Experiment zur Verfügung. Der dort ansässige Physiker Wolfgang Stoeffl entwarf das erste Kühlsystem. Wir verwenden noch heute einen großen Teil seiner raffinierten Konstruktion. Tanner entwickelte hauptsächlich das Innenleben des Experiments, ausgehend von dem früheren Projekt an der University of Florida. Meine Gruppe am MIT baute schließlich einen Mikrowellenverstärker mit extrem geringem Rauschen. Unser ADMX-Experiment war

IAN ALLEN PHOTO



Komplexe Elektronik steuert das Experiment (links) und liefert den Ingenieure die Daten der Sensoren (rechts).

als erstes hinreichend leistungsfähig, um plausible Dunkle-Materie-Axionen prinzipiell nachzuweisen. 1998 veröffentlichten wir unsere Erkenntnisse aus dieser Frühphase. Wir hatten die flüchtigen Teilchen zwar nicht gefunden, aber sahen uns auf einem guten Weg.

Unterdessen waren wir weiter auf der Suche nach Ideen für einen Verstärker, der empfindlich genug für das schwache Signal der Axionen sein würde. Zu jener Zeit hörte ich einen Vortrag von John Clarke, einem brillanten Quantenphysiker der University of California in Berkeley. Er arbeitete an so genannten SQUIDs (superconducting quantum-interference devices, Englisch für supraleitende Quanteninterferenzeinheiten). Diese funktionieren auf Grundlage des Quantenphänomens des Tunnelns. Das ist die Fähigkeit eines Teilchens, eine Barriere zu durchdringen, die es aus klassischer Sicht nicht überwinden könnte. Bei unserem Experiment würde ein entstehendes Photon ein kleines magnetisches Feld im SQUID hervorrufen und damit den Tunneleffekt auf messbare Weise unterdrücken. Derartige Geräte sind extrem empfindlich – doch gab es seinerzeit keine für den Mikrowellenbereich. Clarke entwickelte allerdings einen Verstärker, der dank einer ausgeklügelten Geometrie bei solchen Frequenzen funktionierte.

Dennoch blieben einige Probleme ungelöst. So könnten die winzigen Magnetfelder des Signals in den viel stärkeren Magnetfeldern des Hohlraums im ADMX untergehen. Die Gutachter des Energieministeriums bewerteten den geplanten Einsatz des SQUIDs deshalb Anfang 2002 als »hochris-



IAN ALLEN PHOTO

kant«. Zu dieser Zeit wechselte ich gerade ans Lawrence Livermore Lab. Wir entschieden, ADMX in zwei aufeinander folgende Abschnitte aufzuteilen: In der Phase 1a wollten wir zeigen, dass SQUIDs in dem starken Magnetfeld des Experiments grundsätzlich funktionieren. In der Phase 1b würden wir dann den Verdünnungskryostaten hinzufügen, um die nötigen tiefen Temperaturen zu erreichen.

Zu Beginn der Phase 1a entwickelten wir ein System, welches das empfindliche Magnetfeld des SQUIDs vor dem starken Feld des Experiments schützt. Um dieses zu kompensieren, konstruierten wir ineinander geschachtelte Abschirmungen und Magneten um eine Hauptausgleichsspule herum. Mitte der 2000er Jahre funktionierte der Aufbau, und wir konnten mit der Arbeit am wichtigsten Element für die Phase 1b beginnen, dem Verdünnungskryostaten.

Das Experiment geht in die nächste Generation

Nachdem ich an die University of Washington gewechselt war, kam 2010 auch das ADMX-Experiment dorthin. Der neue Standort war technisch besser ausgerüstet. Inzwischen hatten das Energieministerium und die National Science Foundation damit begonnen, für die Suche nach Dunkler Materie Konzepte für Detektoren der nächsten Generation zu entwerfen, die gegenüber den bisherigen eine erheblich höhere Empfindlichkeit haben sollten. Die meisten Experimente, die sich die Planer vorstellten, waren für WIMPs gedacht. Es gab aber auch Interesse an Axionen. Die Phase 1b unseres Experiments passte gerade in das Programm – und damit war der Detektor »ADMX Gen 2« geboren, der 2016 in Betrieb ging und bis 2021 laufen soll. ADMX Gen 2 konnte endlich mit dem Verdünnungskryostaten aufwarten. Das Instrument vervielfachte effektiv die Rate, mit der wir Daten aufnehmen konnten. Mit zahlreichen Änderungen hatten wir die Empfindlichkeit des Experiments erhöht, und der größte Teil des aus vielen komplizierten Komponenten bestehenden Aufbaus funktioniert inzwischen zuverlässig. Das sollte uns erlauben, systematisch alle möglichen Massen der Axionen von 1 bis 40 Mikroelektronvolt abzuscannen. In dem Bereich vermuten Forscher die Teilchen am ehesten.

Freilich besteht immer die Möglichkeit, dass uns die Natur überrascht und Axionen der Dunklen Materie leichter oder schwerer sind als gedacht. Mit dem Instrument ließe sich durchaus noch im Bereich etwas geringerer Massen suchen. Es wäre jedoch schwierig, nach noch gewichtigeren Axionen Ausschau zu halten: Mit der Masse würde auch die zugehörige Resonanzfrequenz des Hohlraums zunehmen. Das bedeutet, dessen Durchmesser muss kleiner werden, was wiederum das untersuchte Volumen reduziert. Wir könnten zum Ausgleich mehrere Hohlräume in einem einzigen Magneten unterbringen, doch die schiere Komplexität eines solchen Systems ist abschreckend. Andererseits könnten wir mit einem kleineren Volumen leben, wenn wir dafür ein stärkeres Magnetfeld hätten. Das wäre teuer, trotzdem untersuchen wir auch diese Möglichkeit. Bei erheblich größeren Massen – in der Nähe eines Millielektronvolt – könnten wir Signale der Axionen aus dem All erhalten. Wenn die Teilchen sich als so genannte Halos um Galaxien sammeln, dürften sich schwache Emissionslinien in Radioteleskopen bemerkbar machen.

Letztlich sollten ADMX und andere Projekte den theoretischen Spielraum für die Masse von Axionen der Dunklen Materie vollständig ausloten können. Diese Tatsache macht Suchkampagnen attraktiv, denn irgendwann lässt sich der gesamte plausible Bereich abhaken, im Gegensatz zu einigen alternativen Kandidaten für Dunkle Materie.

Parallel zu unseren experimentellen Anstrengungen machen auch die Theoretiker Fortschritte. Bei ihren Versuchen, zuverlässigere Vorhersagen für die Masse des Axions zu erhalten, nutzen sie Supercomputer und extrem anspruchsvolle kosmologische Modelle. Dabei zeigt sich etwa, dass sich Axionen möglicherweise auf andere Art im Kosmos verdichten als WIMPs. Die Diskrepanzen könnten geringfügig sein, aber auch dramatisch. Geplante großräumige Kartierungen der Struktur des Universums – beispielsweise mit dem Large Synoptic Survey Telescope, das Anfang der 2020er Jahre seinen Betrieb aufnehmen soll – liefern hoffentlich die nötige Genauigkeit, um zwischen den denkbaren Arten der Dunklen Materie zu unterscheiden.

Während noch vor zwei Jahrzehnten die meisten Forscher darauf gesetzt haben, dass die Dunkle Materie aus WIMPs besteht, wird das Konzept der Axionen zunehmend attraktiv. Ob wir damit richtiglagen, wird sich in nicht allzu ferner Zukunft zeigen. ◂

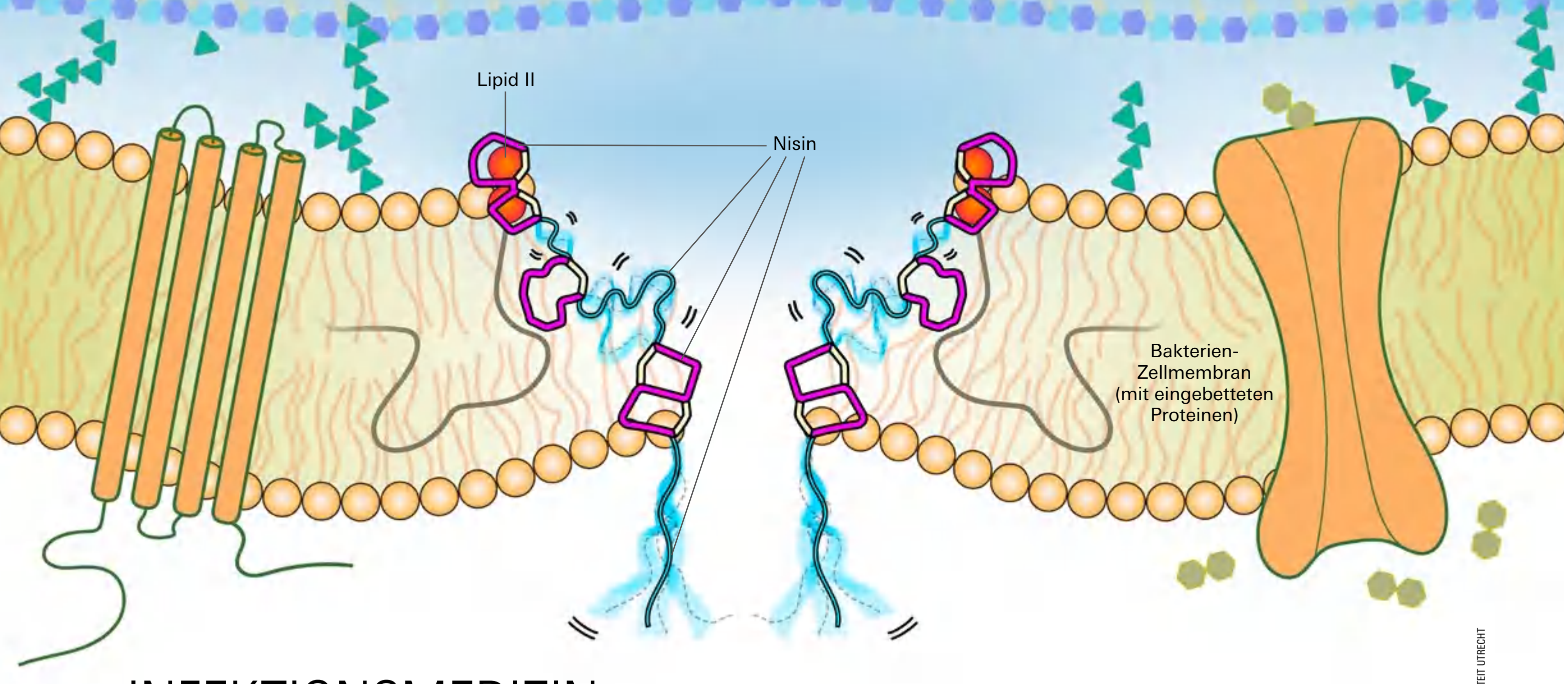
QUELLEN

ADMX Collaboration: Search for Invisible Axion Dark Matter with the Axion Dark Matter Experiment. In: Physical Review Letters 120, 151301, 2018

Sikivie, P.: Axions, Domain Walls, and the Early Universe. In: Physical Review Letters 48, S. 1156–1159, 1982

Weinberg, S.: A New Light Boson? In: Physical Review Letters 40, S. 223–226, 1978

Wilczek, F.: Problem of Strong *P* and *T* Invariance in the Presence of Instantons. In: Physical Review Letters 40, S. 279–282, 1978



JOÃO MEDEIROS-SILVA, UNIVERSITEIT UTRECHT

INFEKTIONSMEDIZIN

ANGRIFF AUF DIE ZELLMEMBRAN

Bestimmte Peptidmoleküle könnten neue, effektive Antibiotika abgeben. Doch weiß man noch nicht viel über ihren Wirkmechanismus. Moderne Untersuchungsmethoden liefern erste überraschende Erkenntnisse.

Antibiotika sind aus der Medizin nicht mehr wegzudenken. Ohne sie ließen sich bakterielle Infektionen oft nicht behandeln beziehungsweise vermeiden; damit wären auch chirurgische Eingriffe, Krebstherapien und vieles mehr nur sehr eingeschränkt möglich. Doch leider werden bakterielle Krankheitserreger zunehmend gegen die Arzneistoffe resistent. Die Gründe hierfür reichen vom massenhaften Antibiotikaeinsatz in der Viehzucht, übermäßigen Verschreibungen in der Humanmedizin bis hin zum Mangel an neuen Antibiotikazulassungen, weil sich die Entwicklung entsprechender Wirkstoffe für Pharmaunternehmen häufig nicht lohnt.

Eine groß angelegte Studie des Europäischen Zentrums für die Prävention und die Kontrolle von Krankheiten (ECDC), erhoben für 30 europäische Staaten, hat dies im zurückliegenden Jahr einmal mehr deutlich gemacht. Gestützt auf umfassende Beobachtungsdaten hat sie gezeigt, dass in Europa jährlich mehr als 670 000 Infektionen und 33 000 Todesopfer auf das Konto antibiotikaresistenter Bakterien gehen; betroffen sind vor allem Kleinkinder und alte Menschen. Das entspricht den Auswirkungen von HIV, Influenza und Tuberkulose zusammengenommen. Allein in Deutschland gab es im Jahr 2015 mindestens 50 000 Infektionen mit antibiotikaresistenten Keimen.

Daher bedarf es dringend neuer antibakterieller Wirkstoffe, gegen die noch keine Resistenzen bestehen. Die Antibiotika der nächsten Generation sollten auf neue Angriffspunkte zielen – und zwar idealerweise auf solche, die den Bakterien nur sehr geringe Chancen zur Resistenzbildung einräumen. Arzneistoffe, die so etwas leisten, ließen sich über lange Zeiträume hinweg einsetzen, was ihre Entwicklung für Pharmaunternehmen interessant machen würde.

Antimikrobielle Peptide (AMP) scheinen die Anforderung zu erfüllen. Diese Aminosäureketten sind mitunter hoch wirksame Antibiotika, gegen die Bakterien nur schwer Resistenzmechanismen entwickeln können und die bisher in der Humanmedizin kaum eingesetzt werden. Viele Eukaryoten produzieren AMP als Teil ihres angeborenen Immunsystems. Auch Prokaryoten stellen solche Peptide her, unter anderem, um damit bakterielle Konkurrenten zu bekämpfen.

Die meisten AMP binden nicht an spezielle Rezeptoren auf der Zelle, sondern wirken – vermittelt über elektrostatische Wechselwirkungen – auf die elektrisch negativ geladene Zellmembran der Mikroben ein, wodurch sie deren Aufbau oder Funktion stören. Es gibt aber auch spezifisch wirkende AMP, und eine medizinisch besonders interessante Variante von ihnen attackiert einen bakteriellen Membranrezeptor namens Lipid II, auch bekannt als »bakterielle Achillesferse«.

Lipid II ist unter Bakterien allgegenwärtig verbreitet und wirkt daran mit, Grundbausteine des Peptidoglykan-Netzwerks zu transportieren. Letzteres besteht aus linearen und

Wenn das Antibiotikum Nisin auf Rezeptormoleküle namens Lipid II einwirkt, die in den Zellmembranen von Bakterien sitzen, entstehen Membranporen, die für die Bakterien tödlich sind (Abbildung links). Mit Hilfe flexibler Molekülbereiche (blau) passt sich Nisin dabei an die bakterielle Zellmembran an.

untereinander verbundenen Zuckerketten, die eine elastische und engmaschige Schutzhülle um die Zelle bilden und ohne die normalerweise kein Zellwachstum möglich ist. Bestimmte AMP binden an zwei Phosphatgruppen in der Lipid-II-Struktur, die für die Funktion des Rezeptors unverzichtbar und daher hoch konserviert sind (das heißt, sich im Zuge der Evolution fast gar nicht verändern können). Die Bakterien haben deshalb kaum die Chance, sich der Wirkung dieser AMP durch entsprechende Strukturveränderungen zu entziehen, die Wahrscheinlichkeit einer Resistenzbildung ist also gering.

Leider verfügen Forscher nur über wenige Informationen darüber, wie diese Peptide in struktureller Hinsicht wirken, was es erschwert, auf ihrer Grundlage neue Arzneistoffe zu entwickeln. Generell ist es sehr kompliziert, Vorgänge an Zellmembranen strukturell aufzuklären, da AMP keine Kristalle in Membranen bilden und die Flüssigkeits-Kernspinresonanz(NMR)-Spektroskopie nicht in Lipidmembranen funktioniert. Auch sind AMP viel zu klein, um ihre Strukturen und Wirkmechanismen per Kryoelektronenmikroskopie zu untersuchen. Hinzu kommt, dass die komplexen zwischenmolekularen Wechselwirkungen an der Zellmembran wichtig für den medizinischen Effekt der AMP sind. Diese molekulare Umgebung künstlich nachzubilden, etwa mit Detergenzien oder organischen Lösungsmitteln, funktioniert daher nur sehr eingeschränkt. Es wäre ideal, wenn man die Wirkmechanismen solcher Antibiotika direkt an bakteriellen Zellmembranen oder gar an ganzen Bakterien aufklären könnte. Nur so lassen sich die physiologischen und damit medizinisch relevanten Eigenschaften und Strukturen dieser Stoffe ermitteln.

Festkörper-NMR-Spektroskopie hilft, Vorgänge in einem extrem komplexen Medium aufzuklären

Meinen Mitarbeitern und mir gelang es kürzlich erstmals, quantitative strukturelle Studien an Antibiotika-Rezeptor-Komplexen in Zellmembranen mit Hilfe von Festkörper-NMR-Spektroskopie durchzuführen. Diese Methode kann Vorgänge in extrem komplexen Medien auf atomarer Ebene aufklären helfen. Natürliche Zellmembranen enthalten jedoch nur vergleichsweise wenige Lipid-II-Rezeptoren, was zu verschwindend schwachen NMR-Signalen führt. Dieses Problem konnten wir durch den Einsatz moderner Techniken wie der Protonendetektion und der dynamischen Kernspinpolarisation lösen, bei der der so genannte Spin-Polarisationstransfer von ungepaarten Elektronen zu den Atomkernen der Antibiotika eine Rolle spielt.

Jene Methoden ermöglichten es uns, trotz der geringen Menge an Antibiotika-Rezeptor-Komplexen vergleichsweise starke NMR-Signale zu erhalten. Damit konnten wir den Wirkmechanismus von Nisin, dem bekanntesten Lipid-II-bindenden AMP, direkt an der Zellmembran des grampositiven Bakteriums *Micrococcus flavus* auf atomarer Ebene analysieren. Nisin bildet zusammen mit Lipid II einen für Bakterien tödlichen Porenkomplex. Zu unserem Erstaunen stellten wir fest, dass die Struktur der Nisin-Lipid-II-Pore in natürlichen Zellmembranen grundlegend anders sein muss als in organischen Lösungsmitteln. Das ist eine wichtige Erkenntnis, weil sich die bisherigen Annahmen zur Struktur, die zur Entwicklung zahlreicher Wirkstoffvarianten gedient hatten, auf Untersuchungen in organischen Lösungsmitteln stützen. Wir haben zwar die native Struktur der Nisin-Lipid-II-Pore noch nicht komplett aufgeklärt, aber bereits wichtige Erkenntnisse darüber gewonnen. So wissen wir, dass Nisin bestimme flexible Domänen benötigt, um sich an die bakterielle Zellmembran anzupassen und Lipid II effektiv zu binden. Das liefert neue Ansatzpunkte, um das Antibiotikum pharmakologisch zu verbessern.

Zelluläre strukturbiologische Methoden, wie wir sie einsetzen, bieten hochinteressante neue Möglichkeiten, um antibiotische Arzneistoffe zu optimieren, sprich deren Wirksamkeit oder Selektivität zu erhöhen. Insbesondere kann die zelluläre Strukturbiologie helfen, den Mechanismus bakterieller Resistenzen gegenüber membranaktiven Antibiotika im Detail zu verstehen und womöglich zu durchbrechen. Untersuchungen direkt an bakteriellen Erregern können dazu dienen, Antibiotika gezielt auf diese Mikroben zuzuschneiden – andere Bakterien hingegen, etwa solche der Darmflora, unbehelligt zu lassen.

Unser nächstes Ziel ist es, kritische Schwachpunkte von membranaktiven Peptidantibiotika auszumerzen, um deren volles Potenzial zu entfalten. Insbesondere sind Lipid-II-bindende Peptide meist wirkungslos gegen gramnegative Bakterien (also gegen solche mit einer dünnen, einschichtigen Peptidoglykanhülle aus Zuckern und Aminosäuren, der eine zweite Lipidmembran aufliegt), da sie deren zusätzliche Membran nicht durchdringen können. Gerade solche gramnegativen Bakterien sind jedoch laut der oben zitierten ECDC-Studie die Hauptverursacher antibiotikaresistenter Infektionen. Hier braucht es kreatives Wirkstoffdesign oder die Entwicklung neuer Antibiotikacocktails, um diese Hürden zu überwinden. ◂

Markus Weingarth ist promovierter Biochemiker an der Universität Utrecht und leitet dort eine Arbeitsgruppe, die biologische Strukturen mit Hilfe von Festkörper-NMR-Spektroskopie untersucht.

QUELLEN

Cassini, A. et al.: Attributable Deaths and Disability-Adjusted Life-Years Caused by Infections with Antibiotic-Resistant Bacteria in the EU and the European Economic Area in 2015: A Population-Level Modelling Analysis. In: The Lancet 19, 1, S. 56–66, 2018

Medeiros-Silva, J. et al.: High-Resolution NMR Studies of Antibiotics in Cellular Membranes. In: Nature Communications 9, 3963, S. 1–10, 2018

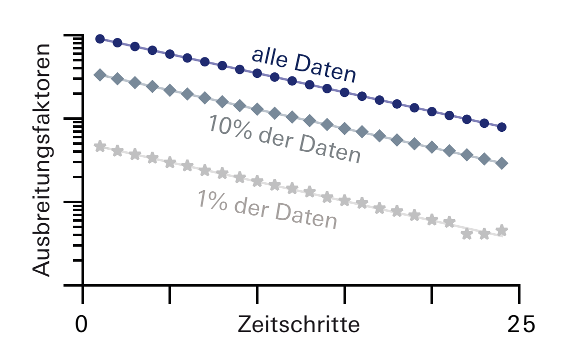
DYNAMISCHE SYSTEME
DER BLICK DURCHS SCHLÜSSELLOCH

Wie kann man zuverlässige Vorhersagen treffen, wenn man nur einen winzigen Bruchteil eines Systems beobachten kann? Eine neue Kenngröße hängt nicht mehr von der Stichprobe ab und könnte in Zukunft der Seuchenkontrolle oder der Hirnforschung zugutekommen.

86 Milliarden Nervenzellen enthält laut einer aktuellen Studie das menschliche Gehirn. Das ist etwas weniger, als es Sterne in der Milchstraße gibt. Seit einigen Jahrzehnten versuchen Hirnforscher, die Aktivität einzelner Neurone zu erfassen, in der Hoffnung, irgendwann die Funktionsweise des Gehirns zu verstehen. Doch auch mit modernsten Techniken können sie lediglich die Signale von etwa 100 Neuronen gleichzeitig aufzeichnen. 100 von 86 Milliarden – das ist, als würde man das System durch ein winziges Schlüsselloch betrachten. Das meiste bleibt uns dabei verborgen.

Wie soll man etwas über das große Ganze sagen, wenn man nur einen winzigen Bruchteil davon beobachten kann? Diese Frage beschäftigt nicht nur Hirnforscher, sie treibt auch Kollegen anderer Forschungsfelder um. Sie spielt etwa bei der Verbreitung von Infektionskrankheiten oder der Vorhersage von Börsencrashs eine Rolle. Wie hoch ist beispielsweise das Risiko, dass aus einer ansteckenden Krankheit eine Epidemie wird? Oder wie wahrscheinlich ist es, dass die Insolvenz einer Bank zu größeren Turbulenzen am Aktienmarkt führt? Um diese Fragen in Zukunft zuverlässig zu beantworten, haben wir eine neue statistische Methode entwickelt.

Auch wenn die Übertragung ansteckender Krankheiten, der Börsenkurs eines Unternehmens und das Feuern von Neuronen auf den ersten Blick nichts miteinander zu tun haben, kann man bei diesen Systemen beobachten, wie sie sich mit der Zeit entwickeln. Diese Entwicklung lässt sich durch mathematische Modelle beschreiben, die von der so genannten internen Aktivierung abhängen, das heißt wenn sich beispielsweise Neurone gegenseitig befeuern oder sich Menschen innerhalb eines Landes untereinander anstecken. Andererseits berücksichtigen die Modelle auch eine mögliche »externe Aktivierung«, falls etwa Sinnesorgane Reize an die Neurone weitergeben oder Viren aus dem Ausland stammen.



Die Ausbreitungsfaktoren sind für Teilproben zu klein, doch ihr Verhältnis (die Steigung) zueinander ist gleich.

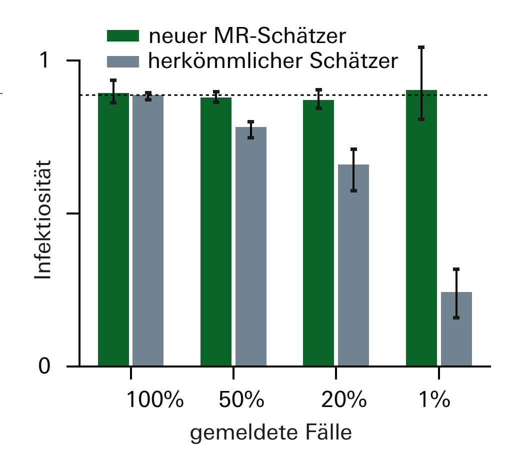
WILTING, J., PRIESEMANN, V.: INFERRING COLLECTIVE DYNAMICAL STATES FROM WIDELY UNOBSERVED SYSTEMS. IN: NATURE COMMUNICATIONS 9, ART. 2325, 10.1038/S41467-018-04725-4, 2018, FIG. 1F; MIT FRDL. GEN. VON JENS WILTING; DT. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Unabhängig davon, ob man neuronaler Aktivität oder Infektionsrisiken auf der Spur ist, bestimmt die Stärke der internen Aktivierung, der »Ausbreitungsfaktor«, maßgeblich die zeitliche Entwicklung eines Systems. So ist es zum Beispiel entscheidend zu wissen, wie viele Nervenzellen ein Neuron typischerweise anregt oder wie viele Personen ein einzelner Erkrankter durchschnittlich ansteckt. In einer idealen Wissenschaftswelt könnte man einen Ausbreitungsfaktor problemlos exakt berechnen. Dazu müsste man lediglich die Aktivität an einem bestimmten Zeitpunkt mit der Aktivität an einem darauf folgenden Zeitpunkt vergleichen und einen linearen Anstieg zwischen den beiden Datenpunkten voraussetzen. Gibt es etwa Dienstag drei erkrankte Personen, Mittwoch sechs und Donnerstag elf, dann wäre der Ausbreitungsfaktor ungefähr zwei. Dieses lineare Regression genannte Verfahren führt bei lückenlos bekannter Aktivität zu einem genauen Ergebnis.

Die Realität macht uns einen Strich durch die einfache Rechnung

Doch leider leben wir nicht in einer idealen Wissenschaftswelt, sondern in der wirklichen, in der Menschen nicht immer zum Arzt gehen, Krankheitsfälle eine Dunkelziffer haben und man höchstens 100 Neurone auf einmal messen kann. Forscher blicken bei ihren Untersuchungen meist nur durch ein Schlüsselloch. Dadurch übersehen sie häufig wichtige Zusammenhänge. Vielleicht hat der Erkrankte A Person B angesteckt, die dann den Virus an C weitergeben hat. Wenn B aber nicht erfasst wurde, scheinen die Erkrankungen von A und C unabhängig voneinander aufzutreten. Führt man eine lineare Regression durch, wirkt es dann, als stelle ein einzelner Erkrankter bloß eine geringe Ansteckungsgefahr dar – selbst wenn er in Wirklichkeit sein ganzes Umfeld infiziert hat.

Wegen der fehlenden Informationen fallen berechnete Ausbreitungsfaktoren eigentlich immer zu klein aus. Das Phänomen wird umso gravierender, je kleiner die Stichprobe ist. Dieses Problem ist Wissenschaftlern schon lange ein Dorn im Auge. Weil es aber an sinnvollen Alternativen mangelt, ignorieren sie es häufig. Aus diesem Grund werden mitunter extrem kleine Stichproben als repräsentativ für das Gesamtsystem angesehen. Welche Folgen das haben kann, zeigt sich besonders drastisch in der Überwachung infektiöser Erkrankungen. Experten sind sich einig, dass die Ebolaepidemie, die 2014 in Westafrika ausbrach,



Anders als bei herkömmlichen Methoden hängt der MR-Schätzer nicht von der Größe der Teilmenge ab.

WILTING, J., PRIESEMANN, V.: INFERRING COLLECTIVE DYNAMICAL STATES FROM WIDELY UNOBSERVED SYSTEMS. IN: NATURE COMMUNICATIONS 9, ART. 2325, 10.1038/S41467-018-04725-4, 2018, FIG. 2D; MIT FRDL. GEN. VON JENS WILTING; DT. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

höchstwahrscheinlich weniger verheerend verlaufen wäre, wenn man die Infektionsraten anfangs nicht deutlich unterschätzt hätte.

Viola Priesemann und ich überlegten deshalb, ob es eine andere Kenngröße für ein System gibt, die nicht von einer Stichprobe abhängt, so dass man unter anderem Infektionsrisiken besser abschätzen kann. Wir wurden fündig, als wir genauer über die herkömmlichen Verfahren und ihre Bedeutung nachdachten.

Bei einer gewöhnlichen linearen Regression vergleicht man jeweils direkt aufeinander folgende Datenpunkte und ermittelt aus ihnen eine Gerade, deren Steigung m dem Ausbreitungsfaktor entspricht. So erfährt man, was sich von einem Zeitpunkt zum nächsten im System verändert.

Wir realisierten, dass es möglich wäre, weitere lineare Regressionen für immer größere Zeitintervalle durchzuführen. Das würde zeigen, wie sich das System von einem Zeitpunkt zum Übernächsten, zum Überübernächsten und so weiter entwickelt. Wenn also eine Person nach einem Zeitschritt durchschnittlich m Personen ansteckt, sind nach zwei Zeiteinheiten im Mittel m^2 Menschen durch sie erkrankt. Jeder einzelne Schritt liefert daher einen neuen Ausbreitungsfaktor potenziert mit dem Zeitschritt k. Wie die auf herkömmliche Weise berechneten Werte fallen unsere Ergebnisse zwar auch kleiner aus als der tatsächliche Ausbreitungsfaktor, allerdings jeweils um den gleichen Faktor b. Während unsere ermittelten Werte m also exponentiell mit den Zeitschritten k ansteigen, bleibt der Faktor b davon unberührt. Und das war die Lösung: Aus dem Zusammenhang, dass unsere Ergebnisse $b{\cdot}m^k$ entsprechen, können wir m ermitteln, ohne b zu kennen (siehe Bild auf S. 22). Durch diese neue Methode hängt die Größe nicht mehr von der Stichprobe ab. Wegen der wiederholten Regressionen haben wir unsere Kenngröße MR-Schätzer genannt (von MR = multiple regressions).

Nun wollten wir unseren Schätzer testen. Dafür eignet sich die Verbreitung ansteckender Krankheiten. Erkrankt

man in Deutschland an einem besonders bedrohlichen Infekt, etwa an Masern, muss man dies dem Robert Koch-Institut melden. Weil zudem die Symptome der Masern relativ eindeutig ausfallen, schätzen wir die Dunkelziffer der Erkrankten in diesem Fall als extrem gering ein. Daher wählten wir dieses Testfeld, um die traditionell durchgeführte, lineare Regression mit unserem neuen MR-Schätzer zu vergleichen. Dazu nutzten wir einen Datensatz des Robert Koch-Instituts, der die Masernfallzahlen in Deutschland enthält. Wie erwartet, liefern beide Methoden das gleiche Ergebnis, solange alle gemeldeten Krankheitsfälle in die Berechnung eingehen: Im Durchschnitt steckt eine an Masern erkrankte Person 0,9 weitere Menschen direkt an.

Genaue Ergebnisse mit nur einem Prozent der Daten

Ganz anders sieht es allerdings aus, wenn man lediglich einen Bruchteil der Daten verwendet. Dazu stellten wir die Situation nach, dass sich nur durchschnittlich die Hälfte aller Erkrankten melden. In diesem Fall zeigt die lineare Regression ein deutlich kleineres Infektionsrisiko von 0,8 an, während der MR-Schätzer konstant bei 0,9 bleibt. Selbst für den Extremfall, dass nur ein Prozent der Erkrankten zum Arzt ging, berechnete der MR-Schätzer zuverlässig die Ansteckungsrate, während die lineare Regression mit 0,25 das Risiko drastisch unterschätzte, in Deutschland an Masern zu erkranken.

Auch die Weltgesundheitsorganisation sammelt Masernfallzahlen. Damit untersuchten wir die Ausbreitung der Krankheit in mehr als 100 verschiedenen Ländern. Der Schätzer ergab erwartungsgemäß, dass die Infektiosität mit wachsender Impfrate in einem Land sinkt.

In unseren Proben erwies sich der MR-Schätzer als nützliches potenzielles Werkzeug zur Seuchenkontrolle. Durch ihn könnten Experten gezielter Epidemien vorhersagen, so dass ein Land rechtzeitig Präventionsmaßnahmen einleiten kann, etwa durch Impfungen.

Darüber hinaus könnte der MR-Schätzer dabei helfen, ungelöste Fragen der Hirnforschung zu beantworten. Denn trotz allem, was wir über Neurone wissen, ist immer noch unklar, wie unsere Gehirne ihre unglaublichen Leistungen vollbringen. Unter den Erklärungsansätzen vertreten einige Neurowissenschaftler zwei Hypothesen, die unterschiedlicher kaum sein könnten. Die eine besagt, dass das Gehirn in lawinenartigen Aktivitätsschüben operiert. In diesem »kritischen Zustand« beeinflussen die Neurone einander stark, wodurch die Hirnaktivität zeitlich extrem schwanken kann. Der zweite Ansatz geht vom Gegenteil aus. Die Aktivität der einzelnen Neurone sei »poissonartig«, was bedeuten würde, dass die Nervenzellen völlig unabhängig voneinander operieren. Doch welche Annahme ist richtig?

Um diese Frage zu klären, haben wir den MR-Schätzer in unterschiedlichen neurobiologischen Situationen bestimmt. Dazu verzeichneten wir die Hirnaktivität im präfrontalen Kortex von Makaken während einer Gedächtnisübung sowie im visuellen Kortex anästhesierter Katzen und im Hippocampus von Ratten auf Nahrungssuche. Wir erhielten ein überraschendes Ergebnis: Die Neurone scheinen weder pauschal kritisch noch poissonartig zu sein. Die Antwort liegt nicht in den Extremen, sondern in der Mitte. Im Normalbetrieb agieren Nervenzellen genau zwischen einem total abhängigen und einem vollkommen zufälligen Zustand. Das kann sich aber ändern. Je nachdem, welche Aufgabe unser Gehirn gerade beschäftigt, kann es offenbar die Vorteile des einen oder des anderen extremen Zustands nutzen. ◂

Jens Wilting ist Doktorand am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen; **Viola Priesemann** leitet die Forschungsgruppe »Theorie neuronaler Systeme« am selben Institut.

QUELLE

Wilting, J., Priesemann, V.: Inferring Collective Dynamical States from Widely Unobserved Systems. In: Nature Communications 9, 2325, 2018

LEUKÄMIE
TRANSIT INS GEHIRN

Blutkrebszellen aus dem Knochenmark können fatale Metastasen im Zentralnervensystem bilden. Dabei nutzen sie möglicherweise eine überraschend direkte Route.

Gelangen bösartige Tumorzellen in das Zentralnervensystem (ZNS), schwinden die Heilungschancen erheblich, denn dort sind sie vor dem Zugriff von Krebsmedikamenten durch die Blut-Hirn-Schranke besser geschützt. Bei der akuten lymphatischen Leukämie (ALL) geschieht das leider häufig. Die Betroffenen müssen daher oft bestrahlt oder mit besonders aggressiven Chemotherapeutika, die in das Nervensystem eindringen können, behandelt werden. Eine wirksamere und weniger belastende Therapie wäre für viele ALL-Patienten ein Segen. Forscher um Dorothy Sipkins von der Duke University in Durham (USA) entdeckten nun eine bisher unbekannte Route, den die Krebszellen zum Vordringen ins ZNS nutzen. Neue Therapieansätze könnten darauf basieren, diesen Weg zu blockieren.

Die Forscher arbeiteten mit Labormäusen, die als Modellorganismen für die menschliche ALL dienen. Dabei interessierten sie sich besonders für das Enzym PI3K (Phosphoinositid-3-Kinase), das Signalwege für Wachstum,

Überleben und Ausbreitung von Krebszellen entscheidend reguliert. Hemmten sie mit einem Wirkstoff speziell die Enzymversion PI3Kδ, breiteten sich die Krebszellen weniger stark ins ZNS aus als bei Vergleichsmäusen. Doch im Knochenmark, das zahlreiche Leukämiezellen enthielt, schien das Mittel nicht zu wirken, und auch der Krankheitsfortschritt außerhalb des Nervensystems blieb unbeeinflusst. Daraus lässt sich schließen, dass die PI3K-Hemmung spezifisch die Fähigkeit der Leukämiezellen beeinträchtigt, ins ZNS zu gelangen.

Missbrauchte Signalwege

Bei der Analyse der Genaktivitäten in den Krebszellen stießen die Wissenschaftler dann auf ein Membranprotein namens α-6-Integrin. Dieser Rezeptor bindet sich wiederum an das Protein Laminin in der extrazellulären Matrix, welche die Blutgefäße umhüllt. Laminine und die an sie andockende Integrine finden sich in den Hirnhäuten sowie im Adergeflecht des Plexus choroideus, wo Immunzellen ins ZNS gelangen können. Sie spielen beim Wachstum und beim Wandern von Neuronen während der Entwicklung des Nervensystems eine wichtige Rolle. Diese Signalwege werden aber offensichtlich ebenfalls von Hirntumoren zur Ausbreitung missbraucht.

Bekanntermaßen können Zellen von soliden Tumoren über den Plexus choroideus in das Gehirn eindringen. Dabei heften sie sich mit dem Protein β-1-Integrin an die Lamininschichten von tief im Gehirn liegenden Blutgefäße an. Mikroskopische Aufnahmen der Forscher um Sipkins wie auch frühere Untersuchungen anderer Wissenschaftler ergaben allerdings keine Hinweise darauf, dass Leukämiezellen diese Blutgefäße oder den Plexus choroideus als Einfallstor zum ZNS nutzen. Vielmehr beobachteten Sipkins und ihre Kollegen unter dem Mikroskop, dass zahlreiche Leukämiezellen an winzigen Blutgefäßen sitzen, die das Knochenmark des Schädels mit den nahegelegenen Hirnhäuten verbinden. Auch diese Gefäße sind von Laminin ummantelt. Demnach könnten die Krebszellen über die äußere Oberfläche solcher Äderchen direkt ins ZNS vordringen (siehe »Abkürzung zum Zentralnervensystem«, unten).

Weitere Analysen an Zellkulturen bestätigten die Hypothese: Die Forscher stießen im Nervenwasser des ZNS auf Signalstoffe, die Leukämiezellen anlocken, was wiederum nur in Gegenwart von α-6-Integrin geschah. Eine Behandlung der leukämiekranken Mäuse mit dem erwähnten PI3Kδ-Hemmer unterband die Krebszellwanderung entlang der Gefäßkorridore vom Knochenmark Richtung Nervensystem. Genauso verhinderte ein Antikörper gegen α-6-

Abkürzung zum Zentralnervensystem

Leukämiezelle
α-6-Integrin
Blutgefäß
Laminin
Haut
Knochen und Knochenmark
Dura mater
Arachnoidea
Subarachnoidalraum
Pia mater
Zentralnervensystem

Das aus Gehirn und Rückenmark bestehende Zentralnervensystem wird von den Hirn- beziehungsweise Rückenmarkshäuten Dura mater, Arachnoidea und Pia mater umschlossen. Hier liegt der mit Nervenwasser (Liquor) gefüllte Subarachnoidalraum. Leukämie entsteht im Knochenmark, kann aber auch den Subarachnoidalraum erreichen und sich dann im Zentralnervensystem ausbreiten, was die Heilungschancen erheblich mindert.

US-amerikanische Forscher haben jetzt einen möglichen Weg entdeckt, den die Blutkrebszellen dabei nutzen. Hierfür binden sich die Zellen mit dem auf ihrer Oberfläche sitzenden Rezeptorprotein α-6-Integrin an das Protein Laminin, das Blutgefäße ummantelt und in den Hirnhäuten vorkommt. Laminin wirkt ebenfalls an der Wanderung der Nervenzellen während der Entwicklung des Nervensystems mit. Die Krebszellen kapern also möglicherweise Komponenten der normalen zellulären Wanderungsrouten und nutzen sie zum Infiltrieren des Zentralnervensystems.

NATURE; WINKLER, F.: A CANCER SHORTCUT TO THE NERVOUS SYSTEM. IN: NATURE 560, S. 35-36, 2018, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Integrin die Ausbreitung ins ZNS – ohne sich auf den Krankheitsverlauf außerhalb des Nervensystems auszuwirken. Und schließlich zeigten Gewebeproben von 26 ALL-Patienten, dass mit Zunahme des α-6-Integrin-Spiegels das Risiko für einen ZNS-Befall anstieg.

Könnte man Tumorzellen daran hindern, das ZNS zu besiedeln, sähen die Chancen für viele Patienten besser aus. Bereits 2010 entdeckte unsere Arbeitsgruppe, damals in München, bei Mäusen, dass Lungenkrebszellen nach der Blockade der durch VEGF-A (Vascular Endothelial Growth Factor) vermittelten Blutgefäßneubildung auch keine großen Hirnmetastasen mehr bilden können. Nun zeichnet sich die ALL durch einen hohen VEGF-A-Spiegel aus, und ein Antikörper gegen dieses Molekül mindert den Befall der Hirnhäute. Wie Sipkins und ihre Kollegen beobachteten, reduziert eine PI3Kδ-Hemmung erheblich die Produktion von VEGF-A. Das wirft die Frage auf, ob Letzterer ebenfalls an der ALL-Ausbreitung im Gehirn beteiligt ist. Zwar spielt die Gefäßbildung für Leukämie als nicht solider Tumor wohl keine große Rolle, aber vielleicht verändert VEGF-A die das ZNS versorgenden Blutgefäße derart, dass sie als Einfallstor für Krebszellen dienen.

Die exakte Route der ALL-Zellen ins zentrale Nervensystem ist aber noch nicht endgültig geklärt. Gibt es die mikroskopisch kleinen Gefäße, die laut Sipkins' Arbeitsgruppe durch winzige Öffnungen aus dem Schädelknochen eine direkte Brücke ins Gehirn schlagen, auch beim Menschen? Es wäre ebenfalls interessant herauszufinden, ob Tumorzellen anderer Krebsarten im Knochenmark den gleichen Weg nutzen können wie ALL-Zellen.

Behandelnde Ärzte dürften sich brennend für Sipkins' Ergebnisse interessieren. Bereits jetzt setzen sie mit Idelalisib einen PI3Kδ-Inhibitor gegen Blutkrebs ein. Die Frage bleibt, ob dieses Medikament auch das Eindringen von ALL-Zellen und anderen Tumoren ins ZNS verhindern kann. ◂

Frank Winkler ist Professor für Experimentelle Neuroonkologie und Geschäftsführender Oberarzt an der Neurologischen Klinik der Universität Heidelberg sowie Arbeitsgruppenleiter am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg.

QUELLE

Yao, H. et al.: Leukaemia Hijacks a Neural Mechanism to Invade the Central Nervous System. In: Nature 560, S. 55–60, 2018

COMPUTERWISSENSCHAFT
WER IST DER NÄCHSTE NACHBAR?

Diese Frage taucht in der Informatik häufig auf – und zwar immer dann, wenn man neue Daten mit einem bestehenden Datensatz vergleicht. Eigentlich wollten fünf Computerwissenschaftler beweisen, dass es keine universelle Methode gibt, die sie schnell beantwortet. Stattdessen fanden sie einen Algorithmus, der es kann.

Bevor man ein Café eröffnet, informiert man sich normalerweise darüber, wo sich der nächste Konkurrent befindet. Dieses Szenario ist ein Beispiel für ein in der Informatik weit verbreitetes Problem: die Suche nach einem nächsten Nachbarn. Allgemein möchte man dabei bestimmen, welcher Punkt in einem vorhandenen Datensatz einem neu hinzugefügten Punkt am nächsten liegt. Diese Aufgabe taucht in den verschiedensten Bereichen auf, von der Genforschung über die digitale Bildersuche bis hin zu Filmempfehlungen von Netflix.

Allerdings gestaltet sich die Suche nach einem nächsten Nachbarn häufig schwierig. In den letzten Jahrzehnten haben führende Computerwissenschaftler versucht, eine allgemeine Lösung zu diesem Problem zu finden. Doch sie scheiterten meist an der Hürde, dass Nähe in verschiedenen Datensätzen vollkommen unterschiedlich definiert ist.

Üblicherweise bestimmt man die Entfernung zweier Punkte über die euklidische Distanz. Dabei zieht man eine Gerade zwischen beide Punkte und misst ihre Länge. Aber es gibt Situationen, in denen andere Konzepte sinnvoller sind. Möchte man beispielsweise in Manhattan einen in Luftlinie fünf Kilometer entfernten Ort ansteuern, kann es sein, dass man dazu erst drei Kilometer nach Osten und dann vier Kilometer nach Norden spazieren muss. In dieser so genannten Manhattan-Metrik folgen alle Verbindungen zweier Punkte einem rasterförmigen Muster.

Entfernung muss nicht zwingend mit einer geografischen Distanz zusammenhängen. Tatsächlich gibt es verschiedenste Abstandsfunktionen (»Metriken«), die etwa Abstände von Genen, Facebook-Freunden oder Filmen bestimmen. In diesen Fällen geben sie an, wie sehr sich zwei Dinge ähneln. Biologen vergleichen etwa Gene über die Editierdistanz: die kleinste Anzahl von Veränderungen, die zwei genetische Sequenzen ineinander umwandeln.

Computerprogramme nach Maß

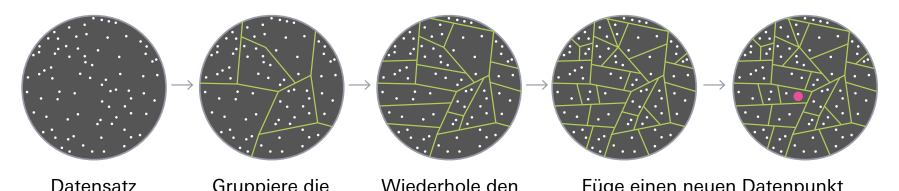
Die Editierdistanz und die euklidische Entfernung sind zwei völlig unterschiedliche Konzepte, man kann die eine nicht auf die andere herunterbrechen. Weil das auch auf viele andere Metriken zutrifft, konnten Informatiker lange Zeit nur spezialisierte Algorithmen entwickeln – maßgeschneidert für Datensätze mit einem bestimmten Typ von Abstand.

Erschwerte Nachbarsuche

Bei der Suche nach einem nächsten Nachbarn geht es darum, den Punkt eines bestehenden Datensatzes zu identifizieren, der einem neu hinzugefügten Punkt am nächsten ist.

Das Problem einkreisen

Informatiker haben Algorithmen entwickelt, die Daten gruppieren, um einen nächsten Nachbarn zu bestimmen.



Datensatz → Gruppiere die Datenpunkte. → Wiederhole den Prozess, bis jede Gruppierung nur noch wenige Punkte enthält. → Füge einen neuen Datenpunkt hinzu. Der nächste Nachbar befindet sich höchstwahrscheinlich in der gleichen Gruppe.

Expander-Graph

Bestimmte Datensätze lassen keine guten Algorithmen zu, die die Datenpunkte so unterteilen, dass man schnell einen nächsten Nachbarn findet.

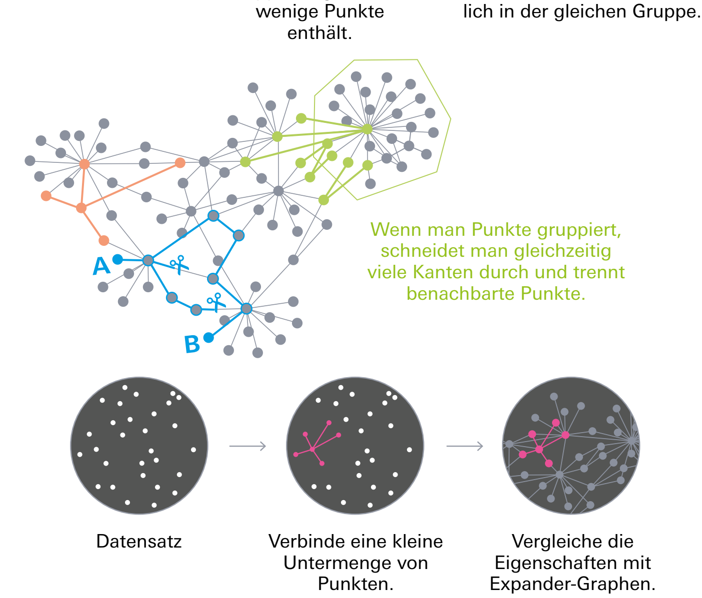
Eigenschaften eines solchen Expander-Graphen:

1) Jeder Punkt hat nur wenige Nachbarn.

2) Viele mögliche Wege verbinden zwei Punkte, wie A und B. Man kann sie nicht separieren, ohne dabei viele Kanten zu durchtrennen.

Expanderartige Datensätze

Indem man die Struktur von Datensätzen mit Expander-Graphen vergleicht, erfährt man, ob ein guter Algorithmus für die Suche nach einem nächsten Nachbarn existiert. Ein solches Programm kann es nicht geben, wenn der Expander-Graph und die Daten Gemeinsamkeiten aufweisen.



Datensatz → Verbinde eine kleine Untermenge von Punkten. → Vergleiche die Eigenschaften mit Expander-Graphen.

LUCY READING-IKKANDA / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Doch nun hat ein fünfköpfiges Team aus Informatikern erstmals eine lang ersehnte universelle Methode gefunden, die für fast alle Metriken zuverlässig und schnell einen nächsten Nachbarn findet.

Um zu bestimmen, welcher Datenpunkt einem neuen am nächsten ist, muss man zuerst die bereits vorliegenden Daten unterteilen. Geht es etwa um die Standorte von Kühen auf einer Weide, dann ordnet man die Tiere in verschiedene Grüppchen. Stellt man anschließend eine neue Kuh auf die Weide, bleibt nur noch zu beobachten, in welcher Gruppe sie gelandet ist. Denn ihr nächster Nachbar befindet sich in derselben. Anschließend spaltet man die Gruppierungen in kleinere Ensembles auf und unterteilt auch diese wieder, bis schließlich eine von ihnen nur noch zwei Elemente enthält: die neue Kuh und ein Tier der ursprünglichen Herde – der gesuchte nächste Nachbar.

Ein »guter« Algorithmus findet solche Unterteilungen schnell und passend, wobei passend bedeutet, dass »nahe Punkte häufig in der gleichen Gruppe landen und ferne Punkte nur selten«, erklärt Ilya Razenshteyn, Computerwissenschaftler bei Microsoft Research.

Im Lauf der Jahre haben Informatiker viele verschiedene Algorithmen entwickelt, die Datensätze auf diese Weise unterteilen. Wenn die Datenpunkte nur durch wenige Werte definiert sind, wie im Beispiel der Kühe, erzeugen die Algorithmen so genannte Voronoi-Diagramme, die zuverlässig einen nächsten Nachbarn einkreisen.

Für höherdimensionale Daten, bei denen Hunderte oder Tausende von Werten einen einzelnen Punkt definieren, werden die Voronoi-Diagramme allerdings zu rechenintensiv. Stattdessen nutzen Informatiker eine Technik namens Locality-Sensitive-Hashing (LSH), die Piotr Indyk und der inzwischen verstorbene Rajeev Motwani 1998 an der Stanford University in Kalifornien entwickelten. LSH-Algorithmen wählen zufällige Unterteilungen. Dadurch sind sie zwar schneller, allerdings auch ungenauer – sie finden nicht zwingend einen nächsten Nachbarn, aber dafür einen Punkt, der in einer vorgegebenen Umgebung eines solchen liegt. Das kommt einer Filmempfehlung von Netflix gleich, die gut genug ist, jedoch nicht die allerbeste.

In der Regel sind LSH-Algorithmen spezialisiert, sie lassen sich also nicht einfach auf Datensätze mit anderen

Metriken (andere »metrische Räume«) übertragen. »Uns fehlte ein Algorithmus, der eine große Klasse von Metriken händeln kann«, sagt Indyk, inzwischen am MIT.

Weil die Suche aber erfolglos blieb, entwickelten Informatiker eine Ausweichlösung – das Prinzip der »Einbettung«. Dabei überlagern sie einen metrischen Raum, für den sie keinen guten Algorithmus kennen, mit einem anderen, für den ein solcher existiert. So können sie den bekannten Algorithmus für beide Abstandsfunktionen nutzen. Ein anschauliches Beispiel wäre, eine Kugeloberfläche aufzuschneiden und glatt zu streichen – wobei natürlich Knicke entstehen –, um Distanzen wie auf einer ebenen Fläche mit einem Lineal zu messen. Weil viele metrische Räume aber wie in diesem Beispiel schlecht zusammenpassen, sind die Ergebnisse meist fehlerhaft. In einigen Fällen erweisen sich Einbettungen sogar als überhaupt nicht möglich.

Wie weit ist Julianne Moore von Kevin Bacon entfernt?

Daher schlugen Ilya Razenshteyn, Alexandr Andoni, Aleksandar Nikolov und Erik Waingarten einen neuen Weg ein: Statt einen allgemein gültigen Algorithmus zu suchen, fragten sie sich, was die Entwicklung eines solchen verhindert. Sie erwarteten, dass die Antwort mit Expander-Graphen zusammenhängen würde – einer besonders schwierigen Konstellation von Datenpunkten, wenn es darum geht, einen nächsten Nachbarn zu finden.

Ein Graph besteht aus einer Sammlung von Knoten, die durch Kanten verbunden sind. Graphen haben ihre eigene Metrik: Der Abstand zweier Knoten entspricht der kleinsten Anzahl von Kanten, die man durchqueren muss, um von einem Knoten zum anderen zu gelangen. So lässt sich beispielsweise die Distanz von Facebook-Profilen bestimmen: Wenn etwa Julianne Moore einen Freund hat, dessen Freund wiederum mit Kevin Bacon befreundet ist, dann beträgt die Entfernung zwischen Moore und Bacon drei.

Mit Graphen lassen sich metrische Räume abbilden. Die Punkte des Datensatzes überlagern dann einen Teil der Knoten des Graphen, und die Kanten spiegeln die durch die Metrik festgelegten Entfernungen wider. Um einen nächsten Nachbarn eines neu hinzugefügten Knotens zu finden, muss man den Knoten des Graphen identifizieren, der zu einem Datenpunkt gehört und durch die wenigsten Verbindungen vom neuen Knoten getrennt ist. Wenn ein Datensatz allerdings die Struktur eines Expander-Graphen hat (so genannte expanderartige Räume), dann gibt es keine Möglichkeit, schnell einen nächsten Nachbarn zu bestimmen.

Expander-Graphen haben zwei scheinbar widersprüchliche Eigenschaften: Während ihre Punkte stark zusammenhängen und man daher viele Kanten durchschneiden muss, um sie zu separieren, sind die meisten Punkte aber nur mit sehr wenigen anderen verbunden. Das heißt, nur eine kleine Teilmenge von Knoten hat eine große Nachbarschaft. »Wenn man die Punkte eines Expanders in zwei Mengen unterteilt, durchtrennt man dabei etliche Kanten und spaltet damit auch viele benachbarte Punkte auf«, erklärt Erik Waingarten von der Columbia University in New York.

Andoni, Nikolov, Razenshteyn und Waingarten wussten bereits, dass expanderartige Räume keine schnellen Algorithmen zum effizienten Bestimmen eines nächsten Nachbarn zulassen. Deshalb wollten sie beweisen, dass all die metrischen Räume, an denen sich andere Wissenschaftler jahrelang die Zähne ausgebissen hatten, expanderartige Eigenschaften besitzen und alle vorherigen Versuche, sie zu zähmen, deshalb scheiterten.

Mit diesem Vorhaben gingen die vier Informatiker zu Assaf Naor, einem Mathematiker und Computerwissenschaftler an der Princeton University, der zuvor an ähnlichen Themen gearbeitet hatte. Sie hofften, er könne einen bereits bekannten expanderartigen Raum in die hoffnungslos komplizierten metrischen Räume einbetten. Dadurch wäre bewiesen, dass auch Letztere expanderartige Eigenschaften besitzen. Nur kurze Zeit später wartete Naor mit einer Antwort auf, die niemand erwartet hatte.

Naor zeigte, dass eine extrem große Klasse von metrischen Räumen (die »normierten« Räume) nicht mit Expander-Graphen zusammenhängen. Die normierten Räume decken die meisten anwendungsrelevanten Datensätze ab, unter anderem die mit euklidischer Distanz oder Manhattan-Metrik. Da Andoni, Nikolov, Razenshteyn und Waingarten zuvor bewiesen hatten, dass einzig expanderartige Eigenschaften die Entwicklung eines guten Algorithmus verhindern, existiert für unzählige komplizierte Metriken eine effiziente Lösung des Nächsten-Nachbar-Problems, auch wenn sie noch nicht gefunden wurde. Doch das sollte sich ändern.

Schon ein halbes Jahr später, im August 2018, konstruierten die vier Computerwissenschaftler zusammen mit Naor eine mathematische Funktion, die eine bereits bekannte effiziente LSH-Unterteilung von Datenpunkten in einem bestimmten normierten Raum nimmt und sie auf jeden anderen normierten Raum übertragen kann – möge die dazugehörige Metrik noch so kompliziert sein. Da eine passende Gruppierung der Knackpunkt bei der Suche eines nächsten Nachbarn ist, haben die Forscher erstmals eine Lösung geliefert, die sich auf alle normierten Räume anwenden lässt. ◂

Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist. Er lebt in Columbia (South Carolina).

QUELLEN

Andoni, A. et al.: Data-Dependent hashing via Nonlinear Spectral Gaps. In: Symposium on Theory of Computing, S. 787–800, 2018

Andoni, A. et al.: Hölder Homeomorphisms and Approximate Nearest Neighbours. In: Symposium on Foundations of Computer Science, S. 159–169, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Universal Method to Sort Complex Information Found« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.





SPRINGERS EINWÜRFE
IM SPINNENNETZ DES KUNSTBETRIEBS

Talent garantiert noch lange keinen Erfolg. Bei bildenden Künstlern entscheidet eher, wo sie im weltweiten Netz der Museen und Auktionen starten.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

⏩ spektrum.de/artikel/1621152

Theorien der künstlerischen Tätigkeit haben es traditionell schwer. Werke, die spontan entstehen und überkommene Regeln brechen, lassen sich schlecht in ein ästhetisches System pressen. Nicht viel besser steht es um die Rezeptionsseite: Dass die Arbeit beim Publikum ankommt, gar die Nachwelt ihren Wert schätzen wird, das darf der Schöpfer nur hoffen, denn auf das analytische Instrumentarium der professionellen Kritiker ist wenig Verlass.

Deshalb hat der große Autor Stanisław Lem 1968 seine zweibändige »empirische Theorie der Literatur« passenderweise »Philosophie des Zufalls« betitelt. Er zeigt an vielen Beispielen, dass der Erfolg eines Textes sich kaum auf dessen ästhetische Vorzüge zurückführen lässt, sondern stochastischen Regeln gehorcht. Die Literaturrezeption gleicht dem zufälligen Zusammentreffen einer Flaschenpost mit jemandem, der sie aus dem Meer des Schrifttums fischt. Sehr präzise konnte Lems Analyse seinerzeit nicht werden, da ihm noch kein statistisch relevanter Datenfundus zur Verfügung stand. Zumindest für die bildende Kunst hat sich das seither geändert.

Während die Literatur ein eher brotloser Beruf geblieben ist, wird im Kunsthandel das große Geld gemacht. Darum liegt dort mit dem Auktionspreis ein quantitatives Maß des künstlerischen Erfolgs vor.

Ein zur Orientierung von Künstlern, Käufern und Museen geschaffenes Internetportal namens Magnus sammelt seit Jahren Daten über Ausstellungen und Versteigerungen in 143 Ländern; es bildet damit die Karrieren einer halben Million bildender Künstler von 1980 bis 2016 ab. Gemeinsam mit dem Ersteller der Datenbank, Magnus Resch, untersuchte ein internationales Team um den amerikanisch-ungarischen Netzwerkanalytiker Albert-László Barabási, wie sich Ansehen und Erfolg im Kunstbetrieb verteilen.

Die statistische Auswertung belegt, dass das künstlerische Renommee entscheidend von der Ausgangslage im Netz des Betriebs abhängt *(Science 362, S. 825–829, 2018)*.

Das Leben der Boheme ist hart, ebenso die Auslese. Die Erfolgsstatistik bietet ein schiefes Bild: Während jeder zweite Künstler in der Datei nur mit einer einzigen Ausstellung vertreten ist, bleiben einige wenige Stars fast allgegenwärtig. Die Hälfte aller Kunstwerke geht für weniger als 4000 Dollar weg, aber Auktionsrekorde übersteigen viele Millionen Dollar.

Auch die Netzstruktur ist äußerst inhomogen. Die Stärke der Verbindungen zwischen dem Museum of Modern Art und dem Guggenheim, beide in New York, ist 33-mal so hoch wie im Mittel. In der übrigen Welt scharen sich zwar ebenfalls lokale Cluster um renommierte Zentren, fristen jedoch gegenüber der Kunstmetropole am Hudson River ein relativ abgehängtes Dasein.

Wem es gelingt, gleich zu Beginn mehrmals nahe dem Zentrum dieses Spinnennetzes auszustellen, der ist auch zehn Jahre später mit hoher Wahrscheinlichkeit noch gut im Geschäft. Wer weit draußen und tief unten in der Kunstprovinz anfangen muss, der tut sich schwer. Nur ein kleiner Prozentsatz besonders Hartnäckiger schafft von dort aus den Aufstieg in die oberen Etagen – und das kann Jahrzehnte dauern. Zudem kommen die schlecht Gestarteten selbst nach jahrzehntelanger Ausdauer bloß auf Verkaufspreise um 40 000 Dollar, während den von Haus aus Glücklichen Auktionserfolge um 200 000 Dollar winken.

Also arbeitet der Kunstbetrieb statistisch gesehen schreiend ungerecht. Doch Ausnahmen bestätigen die Regel: Der derzeit höchstbezahlte lebende Künstler ist der deutsche Maler Gerhard Richter. Er startete einst in der DDR, maximal abgehängt von allen Zentren des Kunstbetriebs. 2002 wurde ihm anlässlich seines 70. Geburtstags eine umfangreiche Ausstellung zuteil – im Museum of Modern Art.

SPRACHE

DER REDE WERT

Warum kann der Mensch sprechen? Ein einzigartiges, alles erklärendes »Sprachgen« scheint es nicht zu geben. Des Rätsels Lösung liegt wohl vielmehr in der ständigen Wiederholung über Generationen hinweg.


NICOLE CLEARY

Christine Kenneally ist Linguistin und lebt in New York. Als preisgekrönte Wissenschaftsautorin hat die gebürtige Australierin unter anderem in »The New Yorker«, »The New York Times«, »New Scientist« und »Scientific American« publiziert.

spektrum.de/artikel/1621154

SERIE

Was ist der Mensch?



IMAMEMBER / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Delfine kommunizieren über Pfeif- und Klicklaute. Damit sprechen sie Artgenossen persönlich an, warnen vor Gefahren etwa durch Haie oder bringen ihrem Nachwuchs bei, wie man Fische fängt. Besäßen sie eine Sprache wie wir, dann könnten sie nicht nur Informationsbruchstücke übermitteln, sondern diese sammeln und zu einem Wissensschatz über die Welt vereinen. Im Lauf der Generationen könnten daraus komplexe Fertigkeiten und Technologien entstehen. Delfine hätten eine Geschichte – und mit ihr würden sie Erfahrungen und Ideen anderer Delfingruppen austauschen. Jedes einzelne Tier könnte von einem anderen, das vielleicht vor Jahrhunderten gelebt hat, einen Gedanken, eine Erzählung oder auch ein Gedicht weitergeben. Über die Sprache profitierte ein solcher Delfin von der Weisheit eines anderen, obwohl dieser längst der Vergangenheit angehört.

Zu einer solchen hypothetischen Zeitreise ist aber nur der Mensch in der Lage, genau wie auch nur Menschen in die Stratosphäre vordringen oder Erdbeerkuchen backen können. Weil wir sprechen, verfügen wir über Technik, Kultur, Kunst und Wissenschaft. Wir sind in der Lage, Fragen zu stellen wie: Warum gibt es Sprache nur beim Menschen? Eine gute Antwort darauf steht noch aus. Linguisten, Genetiker, Hirn- und Verhaltensforscher nähern sich jedoch immer mehr einem echten Verständnis des Phänomens Sprache.

Sprache gilt schon lange als typisch menschlich. Aber herauszufinden, wie und warum das so ist, blieb seltsamerweise lange ein Tabu. In den 1860er Jahren untersagte die Société de Linguistique de Paris jegliche Diskussion über die Evolution der Sprache; ein Jahrzehnt später zog die Philological Society in London nach. Man wollte wohl unwissenschaftlichen Spekulationen Einhalt gebieten, und so wurde das Thema über ein Jahrhundert lang peinlich gemieden. Der einflussreiche Linguist Noam Chomsky vom Massachusetts Institute of Technology rühmte sich jahrzehntelang für sein Desinteresse an der Evolution der Sprache, und diese Einstellung wirkte sich abschreckend auf das ganze Fachgebiet aus. Als ich bei einem linguistischen Anfängerseminar im australischen Melbourne Anfang der 1990er Jahre den Dozenten fragte, wie Sprache entstanden sei, wurde ich zurechtgewiesen: Linguisten stellten diese Frage nicht, weil es unmöglich sei, sie zu beantworten.

Zum Glück änderte sich diese Haltung, und mehrere Wissenschaftler aus verschiedenen Fachgebieten begannen, sich ernsthaft mit dem Thema auseinanderzusetzen. Bald trat ein verblüffender Widerspruch zu Tage. Sprache ist offensichtlich eine ausschließlich menschliche Fähigkeit. Sie besteht aus hochkomplexen, miteinander verknüpften Regelsystemen, nach denen Laute, Wörter und Sätze verknüpft werden und so eine Bedeutung schaffen. Besäßen andere Tiere ein ähnliches System, dann würden wir es entdecken. Aber obwohl mit zahlreichen methodischen Ansätzen danach gesucht wurde, lässt sich bei uns Menschen – weder im Genom noch im Gehirn – nichts Einzigartiges aufspüren, was Sprache erklären könnte.

Es gibt natürlich biologische Merkmale, die sowohl ausschließlich beim Menschen vorkommen als auch fürs Sprechen wichtig sind. So können wir als einzige Primatenart unseren Kehlkopf willentlich kontrollieren. Deshalb verschlucken wir uns gelegentlich, es erlaubt uns aber erst zu artikulieren. Doch diese scheinbar für Sprache gestalteten Körpermerkmale können deren Ursprung und Komplexität niemals vollständig erfassen.

Der 2007 gestorbene Graupapagei Alex konnte rund 100 Gegenstände samt Farbe und Form benennen. Er sprach auch einfache Sätze wie »will Walnuss«. Von der Komplexität einer menschlichen Sprache waren seine Fähigkeiten jedoch noch weit entfernt.



GETTY IMAGES / BOSTON GLOBE / MARK WILSON

Mehr und mehr kristallisiert sich heraus, dass der Widerspruch nicht in der Sprache an sich liegt, sondern in der Betrachtungsweise. Lange glaubten Forscher an eine plötzliche Veränderung, durch die sich Affen in Menschen verwandelten. Parallel dazu seien eine ganze Reihe dramatischer Umwälzungen aufgetreten. Demnach wäre Sprache ein eigenständiges Merkmal, isoliert von anderen geistigen Gaben; eine evolutionäre Anpassung, die alles veränderte und die in der DNA des Menschen fest verankert wäre. Daher suchten wir nach einem entscheidenden biologischen Ereignis, das vor rund 50 000 Jahren die Sprache entstehen ließ.

Befunde aus Genetik, Kognitionswissenschaft und Hirnforschung deuten aber in eine andere Richtung: Sprache ist keine brillante Anpassung; sie ist weder in unserem Genom codiert noch das unvermeidliche Produkt unseres überlegenen Geistes. Vielmehr sprießt sie aus einem Nährboden verschiedener Fähigkeiten, von denen manche sehr alt sind, so dass wir sie mit anderen Tieren teilen, während es sich bei anderen um neue Errungenschaften handelt.

Verhaltensforscher bezweifelten als Erste, dass Sprache charakteristisch für den Menschen sei. Wie die Psychologin Heidi Lyn von der University of South Alabama betont, können wir das typisch Menschliche an der Sprache nur dann ausmachen, wenn wir Vergleiche mit anderen Tieren anstellen. Dabei hatten Wissenschaftler immer wieder behauptet, bestimmte Fähigkeiten seien dem Menschen vorbehalten – bis Studien das Gegenteil belegten.

AUF EINEN BLICK
DER URSPRUNG DER SPRACHE

1 Die menschliche Kommunikation ist weitaus strukturierter und komplexer als sämtliche Gebärden und Lautäußerungen von Tieren.

2 Charakteristische physiologische, neurologische oder genetische Merkmale, mit denen sich die Einzigartigkeit der menschlichen Sprache erklären ließe, scheint es jedoch nicht zu geben.

3 Sprache basiert auf einer Vielzahl an Fähigkeiten, von denen wir manche mit Tieren teilen. Ihre Vielschichtigkeit erwächst aus der Kultur: der wiederholten Weitergabe von Äußerungen über viele Generationen hinweg.

Ein Fingerzeig als entscheidender Schritt der Sprachevolution?

Nehmen wir als Beispiel Gebärden. Manche sind individuell, viele jedoch teilen wir mit unserer Sprachgemeinschaft oder sogar mit allen Menschen. Sprache hat sich in der Evolution als Teil eines Kommunikationssystems etabliert, in dem auch Gebärden eine wesentliche Rolle spielen. Wie bahnbrechende Studien allerdings offenbarten, vollführen Schimpansen ebenfalls sinnvolle Gebärden. So beobachtete Michael Tomasello, heute emeritierter Professor des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, zusammen mit seinen Kollegen, dass bei allen Menschenaffenarten ein Individuum wartet, bis ihm ein Artgenosse seine Aufmerksamkeit schenkt, bevor es Signale übermitteln. Außerdem wiederholt es Gebärden, wenn die gewünschte Antwort ausbleibt. Schimpansen schlagen auf den Boden oder klatschen in die Hände, um auf sich aufmerksam zu machen; und wie ein streitsüchtiger Mensch, der seine Faust hebt, drehen sie die Arme über dem Kopf – normalerweise der Auftakt zum Angriff –, um Rivalen zu warnen.

Wie sich aber in Tomasellos Labor herausstellte, verstehen Menschenaffen nur sehr schlecht eine Geste, mit der ein Mensch beispielsweise auf einen versteckten Gegenstand hinweisen will. Stellt das Zeigen – beziehungsweise die Fähigkeit, es zu verstehen – einen entscheidenden Schritt der Sprachevolution dar? Diese Annahme erschien Heidi Lyn, die mit Bonobos forscht, absurd. »Meine Affen haben immer verstanden, wenn ich auf Dinge gezeigt habe«, erzählt sie. Als sie aber am Yerkes National Primate Research Center der Emory University mit Schimpansen experimentierte, stellte sie überrascht fest, dass die dortigen Affen ihre Zeigegesten überhaupt nicht begriffen.

Lyns Schlussfolgerung: Ob Affen mit Zeigegesten etwas anfangen können, hat nichts mit Biologie zu tun. Ihren Bonobos hatte man beigebracht, mittels einfacher visueller Symbole mit Menschen zu kommunizieren; die Schimpansen dagegen hatten es nicht gelernt. »Weil die Affen nicht auf die gleiche Weise mit Menschen zusammen waren, konnten sie dem Zeigen nicht folgen«, erklärt sie.

Da die Bonobos von Menschen unterrichtet worden waren, galt ihr Können als nicht der Rede wert, meint Lyn bedauernd. Aus dem gleichen Grund wurde Sprachforschung an Papageien, Delfinen und anderen Tieren ignoriert. Doch nach Lyns Ansicht liefern von Menschen trainierte Tiere wichtige Erkenntnisse. Wenn Lebewesen mit einem anderen Gehirn und Körperbau menschenähnliche Kommunikationsfähigkeiten erwerben können, heißt das, dass sich Sprache nicht als etwas ausschließlich Menschliches, als eine von der übrigen Tierwelt abgekoppelte Eigenschaft definieren lässt. Mehr noch: Sprache wird zwar durch biologische Faktoren beeinflusst, nicht aber zwangsläufig von ihnen bestimmt. Bei den Bonobos war nicht die Biologie, sondern die Kultur entscheidend.

Die Liste tierischer Fertigkeiten, die früher als exklusiver Bestandteil der menschlichen Sprache galten, wird inzwischen immer länger. Zum Beispiel Wörter: Kleinaffen wie Meerkatzen warnen ihre Artgenossen vor Gefahren mit wortähnlichen Alarmrufen. Oder betrachten wir den Satzbau, der es ermöglicht, eine unendliche Zahl sinnvoller Sätze zu bilden, die wir verstehen, auch wenn wir sie nie zuvor gehört haben. Der Gesang von Zebrafinken weist ebenfalls eine komplexe Struktur auf, Delfine verstehen unterschiedliche Wortreihenfolgen, und manche Affen in freier Wildbahn können mit einem bestimmten Ruf die Bedeutung eines anderen abwandeln.

In der Liste finden sich zudem kognitive Fähigkeiten wie die »Theory of Mind«, also das Vermögen, sich in andere

gedanklich hineinzuversetzen. Delfine und Schimpansen erweisen sich als wahre Meister im Erraten, was das Gegenüber will. Selbst das angeblich einzigartige Zahlenverständnis bleibt auf der Strecke: Bienen begreifen das Konzept der Null und können wie Rhesusaffen bis vier zählen; Kormorane, die man in China zum Fischen einsetzte, zählten angeblich sogar bis sieben.

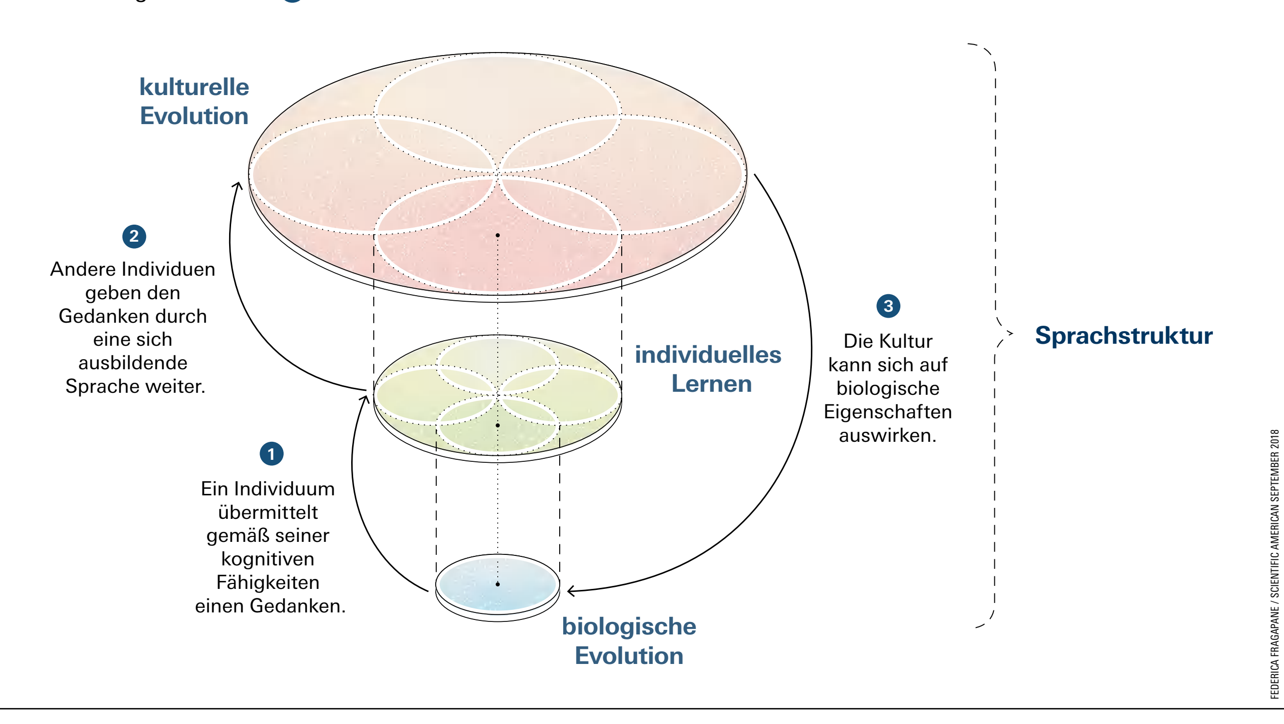
Auf der Liste stehen auch Gene. Das berühmte »Sprachgen« *FOXP2* beeinflusst tatsächlich die Sprache – eine Mutation beeinträchtigt die Artikulation –, besitzt aber darüber hinaus noch weitere Funktionen. Die verschiedenen Effekte lassen sich kaum auseinanderhalten. Nach Ansicht des Genetikers Simon Fisher vom Max-Planck-Institut für Psycholinguistik im niederländischen Nimwegen spielen Gene für die Evolution der Sprache zwar eine entscheidende Rolle, aber »wir müssen uns auch klarmachen, wie Gene funktionieren«. Vereinfacht gesagt codieren Gene für Proteine, die auf Zellen einwirken; bei diesen Zellen kann es sich um Neurone handeln, die untereinander Schaltkreise bilden; und solche Schaltkreise bestimmen wiederum das Verhalten. »Es gibt vielleicht ein Netzwerk von Genen, die für die syntaktische Verarbeitung oder für das ordnungsgemäße Sprechen wichtig sind«, erklärt Fisher, »aber ein einzelnes Gen, das auf magische Weise eine ganze Reihe von Fähigkeiten codiert, existiert sicher nicht.«

Bei Hirnmechanismen hat sich die Sichtweise ebenfalls geändert. Wir wissen inzwischen, dass neuronale Schaltkreise mehreren Zwecken dienen können. So entdeckten Forscher, dass bestimmte Hirnschaltkreise, die für den Spracherwerb wichtig sind, nicht nur beim Lernen von

Die Evolution der Sprache – ein Modell

Sprachen besitzen komplexe Strukturen. Deshalb verstehen wir zum Beispiel, was mit »eine blaue Giraffe« gemeint sein könnte, auch wenn wir diese Wortfolge noch nie zuvor gehört haben. Laut Simon Kirby von der University of Edinburgh und anderen Linguisten erwächst eine Sprachstruktur aus einem wiederholten Wortgebrauch, der Gedanken über viele Generationen hinweg weitergibt. In einem unzählige Male ablaufenden Kreislauf vermittelt ein Sprecher ein Konzept über eine zuvor erlernte Wortfolge an andere (1). Die Fähigkeit, einen Gedanken zusammenhängend mitzuteilen, beruht auf kognitiven Eigenschaften, die wiederum genetisch vererbt werden. Die Empfänger der Äußerung versuchen, sie so gut wie möglich zu verstehen, und reichen sie – gepaart mit eigenen Abwandlungen – an andere in der Gemeinschaft weiter (2). Im Lauf der Generationen häufen sich so kulturelle Veränderungen an. Wer dem dadurch entstehenden Gedankenaustausch besser folgen kann, gibt auch die eigenen Gene mit größerer Wahrscheinlichkeit weiter. Deshalb können die angesammelten kulturellen Verfeinerungen im Lauf der Zeit auch biologische Eigenschaften beeinflussen (3).

Erstaunlicherweise entsteht aus der babylonischen Verwirrung nach und nach Ordnung: Alle Sprecher bemühen sich, die Sprache so gut wie möglich zu lernen, und erzielen dabei eine einzige, strukturierte Sprechweise, die sowohl lernbar als auch für die Informationsübermittlung nützlich ist. Insgesamt erwächst so die Sprache samt ihrer Komplexität aus der Kultur.



Wortlisten, sondern auch bei komplizierten Aufgaben wie Autofahren helfen. Sicherlich sind entsprechende Schaltkreise auch für Tiere bei ähnlichen Problemen nützlich, etwa wenn Ratten durch ein Labyrinth navigieren.

Wie der Kognitionsforscher Michael Arbib von der University of California in San Diego betont, schuf der Mensch »eine materielle und mentale Welt von immer größerer Komplexität«. Egal ob ein Kind in einer Welt mit Dampflokomotiven oder mit iPhones aufwächst, kann es lernen, damit umzugehen ohne jegliche biologische Anpassung. »Soweit wir wissen«, sagt Arbib, »gibt es auf der Erde nur ein Gehirn, das das schafft: das menschliche.« Er betont aber auch, dass unser Denkorgan Teil eines komplexen Systems ist, zu dem auch der restliche Körper gehört: »Hätten Delfine Hände, dann hätten sie vielleicht auch so eine Welt entwickelt.«

Tatsächlich brauchen wir, um uns in unserer Umgebung zurechtzufinden, nicht nur ein Gehirn, sondern eine Gruppe von Gehirnen, die im menschlichen sozialen Umfeld interagieren. In Anlehnung an die evolutionäre Entwicklungsbiologie (kurz Evo-Devo, von englisch: evolutionary developmental biology) spricht Arbib vom Evo-Devo-Socio-Ansatz: Die biologische Evolution wirkt sich auf die individuelle Entwicklung und das Lernen aus, was wiederum die Evolution der Kultur prägt; umgekehrt wird das Lernen aber auch von der Kultur beeinflusst. Um Sprache zu verstehen, muss das menschliche Gehirn als Teil solcher Systeme betrachtet werden. Sprache entstand aus vielen Wurzeln, so Arbib. Es gab nicht den einen Schalter, der umgelegt wurde, sondern zahlreiche. Und das geschah nicht gleichzeitig, sondern im Lauf langer Zeiträume.

Ständiges Wiederholen schafft Strukturen, wo zuvor keine waren

Auch für den Kognitionsforscher Simon Kirby, der an der University of Edinburgh das Centre for Language Evolution leitet, spielt Kultur eine entscheidende Rolle. Er findet den Gedanken faszinierend, dass Sprache nicht nur unmittelbar von anderen erlernt, sondern über Generationen weitergegeben wird. Wie wirkt sich dieser ständig wiederholte Akt des Lernens auf die Sprache selbst aus?

Um dieser Frage nachzugehen, ersann Kirby eine neue Methode zur Erforschung der Sprachevolution. Statt Tiere oder Menschen zu beobachten, schuf er digitale Modelle, die er mit chaotischen, zufälligen Sprachfolgen fütterte. Solche so genannten Agenten erlernten Sprache von anderen und brachten sie wiederum neuen Agenten bei. Kirby beobachtete über viele Generationen von Schülern und Lehrern, wie sich die Sprache dabei veränderte. Das Szenario ähnelt einer »stillen Post«, bei der eine Nachricht von einer Person zur nächsten weitergegeben wird und am Ende häufig ganz anders klingt als am Anfang.

Wie Kirby feststellte, neigten seine künstlichen Agenten dazu, mehr Strukturen zu erzeugen, als sie ursprünglich aufgenommen hatten. Obwohl die vorgegebenen Sprachfolgen anfangs zufällig erzeugt waren, erschienen sie schließlich mehr oder weniger strukturiert. »Wenn man so will, haben sich die Schüler die Eingabestrukturen eingebildet«, erklärt Kirby. Sobald die Agenten eine scheinbare Struktur aufspürten, wo eigentlich keine war, reproduzierten sie diese bei der Weitergabe, so dass sich immer mehr Strukturen herausbildeten.

Die einzelnen Veränderungen mögen nur winzig gewesen sein, sie summierten sich aber im Lauf der Generationen zu »einer Lawine«, bemerkt Kirby. Interessanterweise erschien die Sprache der Computermodelle nach vielen Durchgängen nicht nur immer stärker strukturiert, sondern die sich herauskristallisierenden Strukturen glichen auch denen einer einfachen Version einer natürlichen menschlichen Sprache. Kirby experimentierte daraufhin mit verschiedenen Modellen, die er mit unterschiedlichen Daten fütterte – Ergebnis: »Die kumulative Anhäufung linguistischer Struktur schien immer stattzufinden, ganz gleich, wie wir die Modelle bauten.« Das ständig wiederholte Lernen erwies sich als Schmelztiegel, in dem Sprache entstand.

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/sprache-und-linguistik**


ISTOCK / 4FR

Inzwischen überprüft Kirby seine Computermodelle an der Realität: Wenn Menschen oder auch Tiere Lernstoff ständig wiederholen, bildet sich tatsächlich eine Struktur heraus. Die Beobachtung erklärt, warum wir nie ein einzelnes Gen, eine Mutation oder einen Hirnschaltkreis dingfest machen können, um Sprache zu erklären. So etwas gibt es einfach nicht. Sprache erwächst offensichtlich aus einer Kombination von biologischen Faktoren, individuellem Lernen und der Informationsweitergabe von einem Individuum zum anderen. Die drei Systeme arbeiten in unterschiedlichen Zeitmaßstäben, aber wenn sie ineinandergreifen, schaffen sie etwas Außergewöhnliches: Sprache.

In der kurzen Zeit, seit der die Sprachevolutionsforschung existiert, haben die Wissenschaftler nicht den heiligen Gral gefunden, also das eindeutige Ereignis, das Sprache erklärt. Aber ihre Befunde deuten an, als ginge eine solche Suche ohnehin an der Sache vorbei. Natürlich ist Sprache ein einzigartiges biologisches Merkmal. Sie offenbart sich jedoch als viel fragiler, unvorhersehbarer und stärker vom Zufall bestimmt als bislang vermutet. ◂

QUELLEN

Arbib, M.A.: How the Brain Got Language. The Mirror System Hypothesis. Oxford University Press, Oxford 2012

Kenneally, C.: The First Word. The Search for the Origins of Language. Penguin Random House, New York 2008

Kirby, S.: Culture and Biology in the Origins of Linguistic Structure. In: Psychonomic Bulletin & Review 24, S. 118–137, 2017

Lyn, H.: The Question of Capacity: Why Enculturated and Trained Animals have much to Tell Us about the Evolution of Language. In: Psychonomic Bulletin & Review 24, S. 85–90, 2017

NEUROWISSENSCHAFT MIT TOLLWUTVIREN INS GEHIRN GESCHAUT

Gentechnisch veränderte Tollwuterreger helfen Wissenschaftlern dabei, neuronale Verknüpfungen zu untersuchen – mit bisher unerreichter Präzision.



Andrew J. Murray ist Neurowissenschaftler am Sainsbury Wellcome Center for Neural Circuits and Behaviour in London. Seine Arbeitsgruppe untersucht, wie neuronale Netzwerke Bewegungen steuern.

spektrum.de/artikel/1621162

Im fahlen Licht der Mondnacht, das über dem englischen Moor lag, erstarrten die drei Reisenden vor Grauen darüber, was sie vor sich sahen: ein widerliches Wesen, eine große schwarze Bestie von der Gestalt eines Hundes, nur viel größer als irgendein Hund, den je eines Sterblichen Auge erblickt hatte. Vor ihren entsetzten Augen riss das Tier Hugo Baskerville die Kehle heraus. Dann sah es mit glühenden Augen und triefenden Lefzen auf die Drei, und sie schrien vor Angst und ritten um ihr Leben.

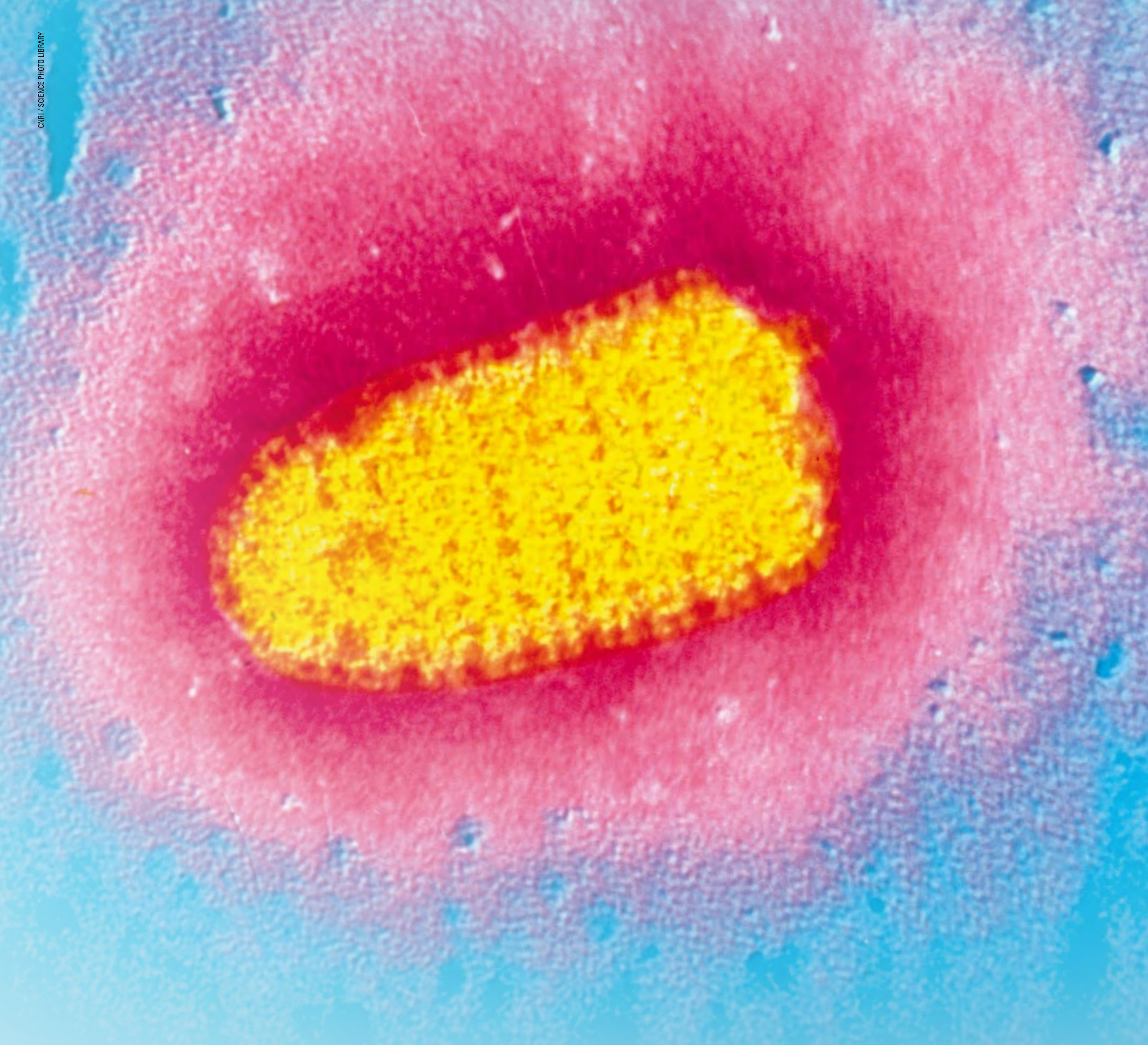
»Der Hund von Baskerville«, einer der bekanntesten Romane Arthur Conan Doyles, ist noch heute eine schaurige Lektüre. Glaubt man Medizinhistorikern, wirkte er auf Doyles Zeitgenossen aber weitaus beklemmender als auf uns – und zwar, weil die Tollwut damals viel präsenter war und die Angst davor viel verbreiteter. Mit seiner Fähigkeit, ein zahmes Haustier in eine wütende, schäumende Bestie zu verwandeln, deren Biss den nahezu sicheren Tod bedeutete, war das Tollwutvirus eine der gefürchtetsten Geißeln der Menschheitsgeschichte.

Bereits im Jahr 1804 belegten Experimente des deutschen Arztes Georg Gottfried Zinke (gest. 1813), dass der Speichel tollwutkranker Tiere das Virus in großen Mengen enthält. Der Befall mit diesem Erreger führt zu erhöhter Aktivität der Speicheldrüsen, zu Schluckstörungen und somit zu dem typischen Geifern tollwütiger Hunde. Louis Pasteur (1822–1895), der Mitbegründer der medizinischen Mikrobiologie, bewies zudem in den 1880er Jahren, dass das Virus das Gehirn der infizierten Tiere befällt. Beide Eigenschaften treten nicht zufällig gemeinsam auf. Wie die Forschung der zurückliegenden beiden Jahrhunderte gezeigt hat, kombiniert der Erreger die besondere Befähigung dafür, über den Speichel des Wirts übertragen zu werden, mit dem Vermögen, diesen zu aggressivem Beißverhalten anzustacheln. Anders gesagt: Das Virus manipuliert die Hirnfunktionen des Wirts, wodurch es sehr effektiv weitere Tiere infizieren kann.

Heute noch sterben jährlich weltweit rund 60 000 Menschen an Tollwut. Dank wirksamer Impfstoffe und der frühzeitigen Quarantäne infizierter Tiere hat die Erkrankung jedoch in der entwickelten Welt ihren Schrecken großteils verloren. Neurowissenschaftler setzen den Erreger heute sogar als Forschungswerkzeug ein. Das Virus arbeitet sich nämlich von der Bisswunde bis ins Gehirn vor, indem es von Neuron zu Neuron springt und so vermeidet, von der Immunabwehr entdeckt zu werden. Verschiedene Forscher, darunter meine Gruppe am Sainsbury Wellcome Center for Neural Circuits and Behaviour in London, nutzen diese Eigenschaft des Erregers, um Verbindungen zwischen Nervenzellen sichtbar zu machen.

Ungeheuer komplexes Netzwerk

Das menschliche Gehirn besteht aus Milliarden Neuronen, von denen jedes einzelne mit tausenden anderen verknüpft sein kann. Ohne die Strukturen in diesem ungeheuer komplexen Netz aufzuklären, ist es wohl nicht möglich zu verstehen, wie unser Zentralnervensystem Empfindungen hervorbringt und Verhaltensweisen steuert. Dank künstlich veränderter Varianten des Tollwutvirus können wir heute herausfinden, welche Signale ein bestimmter Neuronentyp empfängt, wie elektrische Impulse vom Auge ins Gehirn gelangen oder welche Nervenzellen unsere Körperhaltung kontrollieren. Noch steckt die Forschungsdisziplin in den Anfängen, aber künftig dürfte sie dazu beitragen, die Mechanismen neurodegenerativer Erkrankungen wie Morbus Parkinson aufzuklären und wirksame Behandlungsmethoden zu entwickeln.



Das Tollwutvirus hat die Form eines Pistolengeschosses, ist rund 180 Nanometer (milliardstel Meter) lang und löst tödliche Gehirnentzündungen aus.

Mit dem Biss eines tollwütigen Tiers gelangen Viruspartikel in das Muskelgewebe des Opfers. Diese Erreger, auch Rabiesviren genannt, ähneln äußerlich Pistolengeschossen und enthalten eine einzelsträngige RNA als Träger der Erbinformation sowie verschiedene Proteine. Zusammen mit einem davon, dem Nukleoprotein N, ist die RNA in einem Komplex verpackt. Jedes Virus besitzt eine Hülle aus Glykoproteinen: Eiweißen, die Zuckergruppen tragen. Die Hülle besitzt winzige Ausstülpungen, so genannte Spikes, und spielt beim Infektionsgeschehen eine zentrale Rolle, indem sie bestimmte Nervenzellen nahe der Bissstelle dazu veranlasst, die Viren in sich aufzunehmen. Diese Zellen sind über eine lange Kette weiterer Neurone mit dem Gehirn des Bissopfers verbunden – dem eigentlichen Ziel des Virus.

Genau gesagt binden die viralen Glykoproteine an Rezeptormoleküle auf der Oberfläche von Motoneuronen – das sind Nervenzellen, die elektrische Signale auf Muskelzellen übertragen. Diese Signale laufen über Verbindungen (Synapsen) zwischen den Nerven- und den Muskelzellen hinweg. Ähnlich wie die Tür zum Sicherheitsbereich eines Flughafens, durch die man nur in eine Richtung gehen kann, leiten auch diese Kontaktstellen ihre Signale normalerweise nur in eine Richtung, nämlich von der Nerven- zur Muskelzelle. Generell bewegen sich Nervenimpulse, die das Gehirn an den Bewegungsapparat sendet, stets »stromabwärts«, das heißt von Neuron zu Neuron kontinuierlich zu den Muskeln hin. Das Tollwutvirus muss jedoch »stromaufwärts« wandern, um das Gehirn zu erreichen, und das gelingt ihm auf raffinierte Weise.

Sobald der Erreger in eine Nervenzelle eingedrungen ist, streift er seinen Glykoproteinmantel ab, und seine RNA kommt zum Zug. Die Zelle beginnt, Kopien der viralen RNA und sämtlicher Virusproteine herzustellen, die sich dann zu Tochterviren zusammenfügen. Allerdings begrenzt das Tollwutvirus seine Replikation strikt: Es bringt die Wirtszelle dazu, nur gerade so viele neue Erreger zu produzieren, dass diese über eine Synapse hinweg in das nächste »stromaufwärts« gelegene Neuron eindringen können. Dort wiederholt sich der Prozess: Hülle abwerfen, einige Tochterviren hervorbringen, zum nächsten Neuron weiterwandern. Auf diese Weise arbeitet sich der Erreger allmählich durchs Nervensystem vor – vom anfänglich infizierten Motoneuron zum Rückenmark und weiter ins Gehirn.

Während viele andere Virusarten sich dermaßen schnell vermehren, dass die von ihnen infizierten Zellen aufbrechen und die Tochterviren in die Umgebung freisetzen, lässt der Tollwuterreger auf Grund seiner sparsamen Replikation die Nervenzellen intakt, während er zum Gehirn vordringt. Auf diese Weise richtet er nie genug Schaden an, um die Immunabwehr auf sich aufmerksam zu machen. Dieses heimliche Voranschreiten erklärt, warum nach der anfänglichen Infektion eine lange Zeit verstreicht, bis die ersten Symptome der Krankheit auftreten: beim Menschen typischerweise ein bis drei Monate.

In den frühen 2000er Jahren begannen mehrere Forscherteams damit, das Tollwutvirus als Sonde zu nutzen, um neuronale Netze zu untersuchen. Zu ihnen gehörte die Arbeitsgruppe von Gabriella Ugoloni, mittlerweile am Institut für Neurowissenschaften der Université Paris Saclay, und das Team um Peter Strick, der heute an der University of Pittsburgh tätig ist. Den Weg des Virus von den Muskeln ins Gehirn nachzuverfolgen, ist allerdings ziemlich schwierig. Wie kann man als Neurowissenschaftler unterscheiden, welche Nervenzelle der Erreger zuerst, welche als zweite, als dritte und so weiter befällt?

Die Forscher gingen dieses Problem zunächst an, indem sie Versuchstiere mit Tollwutviren infizierten und kurz darauf töteten, so dass der Erreger bis dahin erst ein bis zwei Synapsen überwunden hatte. Dieser Ansatz lieferte einen ersten Einblick in die wichtigsten Signalwege der Bewegungssteuerung. Doch er hatte Nachteile, denn nicht alle Verbindungen zwischen Neuronen sind gleich. Eine Synapse kann stark oder schwach sein – davon hängt ab, ob ein über sie hinweg laufender Nervenimpuls sich im nachfolgenden Neuron fortpflanzt oder nicht. Sie kann entweder dicht am Zellkörper eines Neurons sitzen oder weit draußen am Ende eines Zellfortsatzes. Überdies besitzen manche Nervenzellen lediglich eine einzige Verbindung zu ihrer stromabwärts gelegenen Nachbarin, andere dagegen haben hunderte davon. Infolge all dieser Dinge kann es sehr unterschiedlich lang dauern, bis das Virus von einem Neuron zum nächsten gelangt, weshalb die Messungen stark streuen.

Ohne Glykoproteine bleibt der Erreger in den befallenen Zellen stecken

Um mit diesem Problem fertig zu werden, mussten die Wissenschaftler das Virus verändern. Hierfür standen ihnen leistungsfähige Methoden zur DNA-Manipulation zur Verfügung. Tollwutviren haben ihre Erbinformation zwar nicht auf DNA, sondern auf RNA abgelegt. Weil sich jedoch DNA- in RNA-Moleküle umschreiben lassen und umgekehrt (mit bestimmten Enzymen namens RNA-Polymerasen beziehungsweise reversen Transkriptasen), ist diese Hürde überwindbar. Im Jahr 1994 produzierten Matthias Schnell und Karl-Klaus Conzelmann, damals an der Bundesforschungsanstalt für Viruskrankheiten der Tiere in Tübingen, ein funktionsfähiges Tollwutvirus auf Basis klonierter DNA. Zudem veränderten sie das RNA-Genom des Erregers.

Die Möglichkeit, das Virusgenom zu manipulieren, führte bald zu einem besseren Verständnis davon, welche Funktion die verschiedenen Erbanlagen darin haben. Es stellte sich heraus, dass eines der Gene unverzichtbar dafür ist, dass der Erreger von Neuron zu Neuron springen kann: jenes nämlich, das für das Glykoprotein codiert. Ein Tollwutvirus ohne dieses Gen kann Zellen zwar noch infizieren, bleibt dann aber in ihnen gefangen. Die Entdeckung half, das Virus zu einem leistungsfähigen biotechnologischen Werkzeug zu machen.

Im Jahr 2007 entwickelten die Neurowissenschaftler Ian Wickersham und Edward Callaway, damals am Salk Institute for Biological Studies in La Jolla (Kalifornien), zusammen mit Forschern vom Friedrich-Loeffler-Institut in Greifswald eine raffinierte Methode, um neuronale Netzwerke zu kartieren. In einem ersten Schritt tauschten sie das Glykoprotein-Gen im Erbgut des Tollwuterregers gegen eine Erbanlage aus, die für ein fluoreszierendes Protein codiert. Das veränderte Virus konnte in der infizierten Zelle nun kein Glykoprotein mehr hervorbringen, ließ dafür aber alle befallenen Zellen bei geeignetem Anregungslicht hell aufleuchten.

Der zweite Schritt bestand darin, den infizierten Neuronen das Glykoprotein auf einem anderen Weg verfügbar zu machen – und den Tollwuterregern damit zu ermöglichen, auf die benachbarten Nervenzellen überzugehen. Zu diesem Zweck nutzten die Forscher ein adeno-assoziiertes

AUF EINEN BLICK
VOM TÖDLICHEN KEIM ZUM NÜTZLICHEN WERKZEUG

1 Das Tollwutvirus hat die besondere Fähigkeit, in Neuronennetzen von Zelle zu Zelle zu springen. Auf diese Weise arbeitet es sich von einer Bisswunde aus bis ins Gehirn eines Tiers vor.

2 Virologen und Neurowissenschaftler nutzen diese Eigenschaft, um herauszufinden, wie Neurone untereinander verknüpft sind.

3 Dabei manipulieren sie das Tollwutvirus so, dass es nur bestimmte Zellen infiziert, diese aufleuchten lässt und lediglich streng kontrolliert auf benachbarte Neurone weiterspringt.

Eiweiße aus Vogelviren ermöglichten es, gezielt nur bestimmte Nervenzellen zu infizieren

Virus (AAV), das so heißt, weil es ein Adenovirus als Helfer benötigt, um sich zu vervielfältigen. AAV besitzen nur ein sehr kleines Genom, aber ihr Erbgut ist trotzdem groß genug, damit die Forscher dort den Bauplan für ein virales Glykoprotein einfügen konnten. Wenn die Wissenschaftler nun Nervenzellen, die von den veränderten Tollwutviren befallen waren, zusätzlich noch mit den manipulierten AAV infizierten, konnten die Tollwuterreger – dank des zusätzlich hergestellten Glykoproteins – die Synapsen zu den benachbarten Nervenzellen überwinden und auch diese infizieren. Sie konnten das Glykoprotein-Gen jedoch nicht mitnehmen, weil dieses als DNA vorlag: AAV haben ein DNA-Genom, Tollwutviren hingegen eines aus RNA. Daher saßen die Tollwutviren, nachdem sie die benachbarten Neurone befallen hatten, dort fest. So war es möglich, immer nur solche Zellen mit dem fluoreszierenden Protein anzufärben, die mit dem zuerst infizierten Neuron direkt verbunden waren.

Allerdings gab es an dieser Stelle noch ein Problem: Wenn die Forscher eine Lösung mit veränderten Tollwutviren in den zu untersuchenden Organismus einspritzten, infizierten sich sämtliche Neurone in der Nähe der Einstichstelle. Ohne eine Möglichkeit, die anfängliche Infektion auf ganz bestimmte Zellen zu begrenzen, konnten die Wissenschaftler nicht unterscheiden, welche Neurone direkt von eingespritzten Erregern und welche erst über eine Synapse hinweg befallen worden waren. Die Lösung dieses Problems kam aus einem weiteren Teilgebiet der Virologie, und zwar aus der Vogelvirenforschung.

Viren in der freien Wildbahn befallen üblicherweise nur bestimmte Wirte. Zum Beispiel löst das aviäre Leukosevirus (ALV) Krebserkrankungen bei Hühnervögeln aus, kann jedoch typischerweise keine Säugerzellen infizieren. Wie das Tollwutvirus hat auch ALV eine Glykoproteinhülle, die in verschiedenen Varianten vorliegen kann. Es gibt mehrere Typen von ALV-Glykoproteinen, die mit Env (für englisch »envelope«, Hülle) und einem Buchstaben für den jeweiligen Subtyp bezeichnet werden. Jeder dieser Subtypen bindet nur an bestimmte Rezeptoren auf den Wirtszellen. EnvA beispielsweise koppelt an ein Molekül namens TVA, abgeleitet von »avian Tumor Virus receptor A«. Zellen, die diesen Rezeptor nicht besitzen, können von EnvA-umhüllten Viren nicht infiziert werden. Dieser Mechanismus ermöglicht es, die Erstinfektion mit veränderten Tollwutviren auf einen bestimmten Neuronentyp zu beschränken.

Wickersham und seine Kollegen ersetzten die natürliche Glykoproteinhülle des Virus durch eine aus EnvA, indem sie das Gen für EnvA in eine mit Tollwuterregern beimpfte Zellkultur einführten. Solcherart verkleidet, waren die Erreger nicht mehr in der Lage, Säugerzellen zu befallen. Statteten die Forscher jedoch ausgewählte Zielneurone (meist in Mäusehirnen) mit dem TVA-Rezeptor aus, drang der Erreger in diese ein. Eine zusätzliche Infektion mit AAV, die das Glykoprotein-Gen des Tollwuterregers enthielten, sorgte dafür, dass die Zellen dieses Protein herstellten. Waren die veränderten Tollwuterreger nun in ihren Zielneuronen angekommen, streiften sie ihre EnvA-Hülle ab, legten ihren natürlichen Glykoproteinmantel an und wanderten »stromaufwärts« weiter ins nächste Neuron.

Dank all dieser Methoden konnten die Wissenschaftler also eine definierte Gruppe von Startneuronen mit Tollwuterregern infizieren und die Viren anschließend exakt einmal – nämlich auf die jeweils benachbarten Zellen – weiterspringen lassen. Das erlaubte es, Nervenzellverbindungen im Gehirn aufzuspüren und aussagekräftige Bilder der dortigen neuronalen Netzwerke zu gewinnen.

Diese Methode – von ihren Erfindern Delta-G-Rabies-System genannt, wegen des veränderten Glykoproteins der Tollwuterreger – eroberte mit ihrer beeindruckenden Raffinesse die Neurowissenschaften im Sturm. Sie verschaffte den Forschern ganz neue Einblicke darin, welche Hirnzellen untereinander Signale austauschen. Doch wie alle neuen Techniken war sie nicht perfekt: Mitunter spürte sie nicht alle Zellverknüpfungen auf.

Um das Jahr 2015 herum setzten meine Kollegen Thomas Reardon, Thomas Jessell, Attila Losonczy und ich, damals alle an der Columbia University, das Delta-G-Rabies-System dazu ein, neuronale Netzwerke zu untersuchen, die an der Bewegungssteuerung beteiligt sind. Da wir dabei nur relativ wenige Verbindungen zu Motoneuronen in Rückenmark und Gehirn entdeckten, kam uns der Verdacht, die Methode liefere ein unvollständiges Abbild der Wirklichkeit. Ein weiteres Problem, mit dem wir uns konfrontiert sahen, war der Schaden, den die veränderten Tollwuterreger anrichteten. Sobald diese ein Neuron infiziert hatten, starb es binnen weniger Wochen ab. Unsere Messsonde veränderte also das Verhalten der Nervenzellen, was die Interpretation der Ergebnisse erheblich erschwerte.

Spezialisierter Virusstamm als Messsonde liefert verlässlichere Ergebnisse

Der bereits erwähnte Matthias Schnell und sein Kollege Christoph Wirblich, heute beide an der Thomas Jefferson University in Philadelphia, hatten Pionierarbeit zur Biologie des Tollwutvirus geleistet, also fragten wir sie um Rat. Die beiden erkannten sofort, dass unsere Probleme mit dem speziellen Virusstamm zusammenhingen, den wir benutzten. Er war ursprünglich gezüchtet worden, um in Impfstoffen verwendet zu werden. Hierfür benötigt man Stämme, die sich ungewöhnlich schnell vermehren, damit die Zahl der Viruspartikel in der Vakzine möglichst rasch zunimmt. Schnell und Wirblich schlugen vor, auf andere Erreger zu wechseln. Da wir unsere Studien an Mäusen durchführten, empfahlen sie einen Virusstamm, der über viele Jahre hinweg darauf abgestimmt worden war, Mäuseneurone zu infizieren.

Das Ausgangsvirus dieses Stamms war aus einem Wildtier isoliert worden. Wissenschaftler hatten es dann wiederholt Mäusegehirne oder Mäuse-Zelllinien passieren lassen. Dabei hatte es sich nach und nach darauf spezialisiert, Nervenzellen der Nager zu infizieren. Mit Hilfe dieses

Nervenzellnetze und Tollwutviren

Das Tollwutvirus arbeitet sich von einer Bisswunde bis ins Gehirn vor, indem es von Neuron zu Neuron springt. Virologen und Neurowissenschaftler nutzen diese Fähigkeit, um herauszufinden, wie Nervenzellen untereinander verknüpft sind.

Der normale Ablauf einer Tollwutinfektion

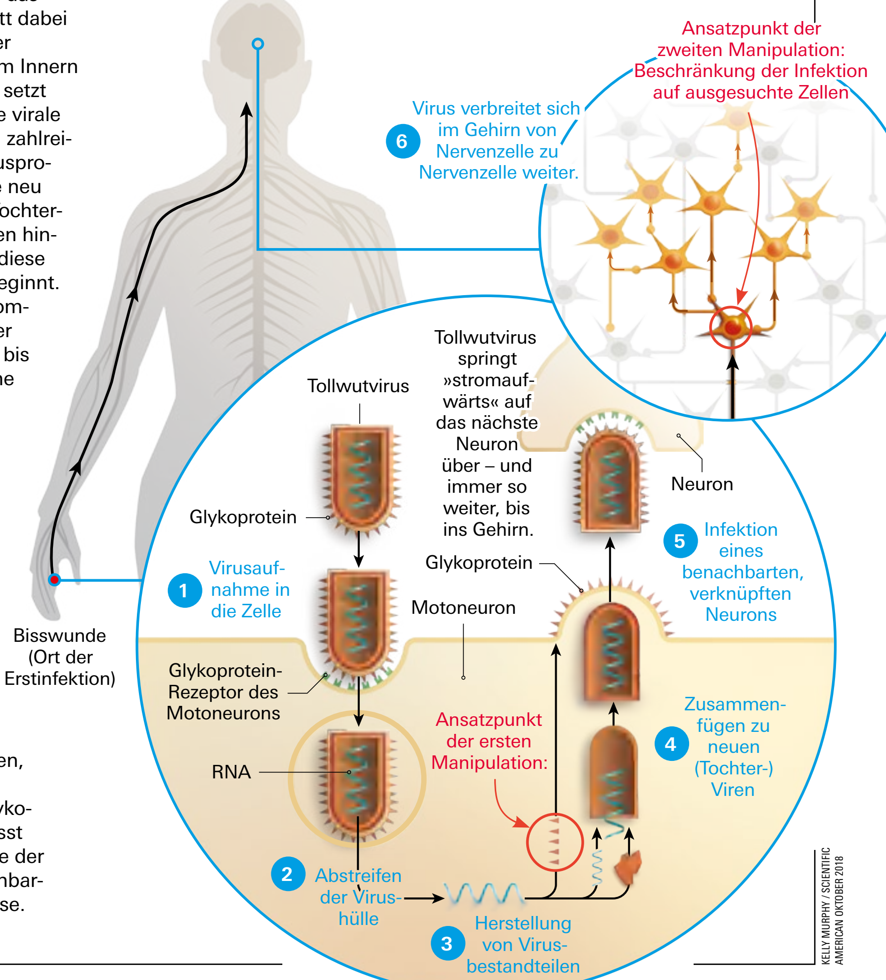
Das Tollwutvirus besitzt eine Hülle aus Glykoproteinen, zuckerhaltigen Eiweißen. Diese Ummantelung veranlasst Motoneurone nahe der Bisswunde dazu, das Virus in sich aufzunehmen ①. Der Erreger tritt dabei über eine Synapse – eine Verknüpfung zu einer anderen Zelle – in das Neuron ein. Sobald er im Innern angekommen ist, streift er seine Hülle ab und setzt sein Genom frei, das aus RNA besteht ②. Die virale RNA nutzt den Syntheseapparat der Zelle, um zahlreiche Kopien von sich selbst sowie von den Virusproteinen anzufertigen ③. Jene Proteine und die neu gebildeten RNA-Stränge fügen sich dann zu Tochterviren zusammen ④, die über Zellverbindungen hinweg in benachbarte Neurone eindringen und diese infizieren ⑤, womit der Zyklus von Neuem beginnt. Der Erreger bewegt sich auf diese Weise »stromaufwärts« (entgegen der üblichen Richtung der Nervensignale) von Neuron zu Neuron weiter, bis er im Gehirn angekommen ist, wo er zahlreiche Nervenzellen befällt ⑥.

Manipulation 1: Gezielter Umbau der viralen RNA

Um den Weg nachverfolgen zu können, den das Virus zum Gehirn nimmt, ersetzen die Forscher das Glykoprotein-Gen in der Virus-RNA durch eine Erbanlage, die den Bauplan für ein fluoreszierendes Protein enthält. Werden Neurone mit dem so veränderten Virus infiziert, stellen sie das Protein her und leuchten (bei geeignetem Anregungslicht) auf, sie erzeugen jedoch kein virales Glykoprotein. Das Virus kann daher nicht in benachbarte Zellen weiterwandern. Um ihm das zu ermöglichen, geben die Forscher zusätzlich ein weiteres Virus namens AAV hinzu, das die Erbanlage für das Glykoprotein trägt. AAV infiziert die Zielneurone und lässt sie das Glykoprotein produzieren, mit dessen Hilfe der Tollwuterreger sodann auf die unmittelbar benachbarten Zellen weiterspringen kann – aber nur auf diese.

Manipulation 2: Austausch der Glykoproteinhülle

Um die anfängliche Infektion mit dem Tollwutvirus auf ausgesuchte Neurone zu beschränken, nutzen die Wissenschaftler den Umstand aus, dass es verschiedene Typen viraler Glykoproteine gibt. Ummanteln sie den Tollwuterreger mit Glykoproteinen, die von Vogelviren stammen, kann er keine Säugetierzellen mehr befallen. Statten sie allerdings ausgewählte Neurone der Versuchstiere mit Rezeptormolekülen aus, die Glykoproteine von Vogelviren erkennen, kann der veränderte Erreger in sie eindringen. Er infiziert dann zunächst nur sie – bis er über Synapsen hinweg in benachbarte Zellen des neuronalen Netzwerks eindringt.



KELLY MURPHY / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2018

Erregerstamms konnten wir viel mehr neuronale Verknüpfungen aufspüren als früher. Da er zudem daran angepasst war, dem Immunsystem der Maus zu entgehen, brachte er in den infizierten Zellen nur relativ kleine Mengen der viralen Proteine hervor und setzte sie somit weniger Stress aus, weshalb die Neurone weitgehend intakt blieben.

Wir optimierten die Viren weiter, indem wir deren Gen für das fluoreszierende Protein durch eine andere Erbanlage ersetzten, die für ein lichtempfindliches Eiweiß codierte – nämlich für ein Channelrhodopsin (ChR), das ursprünglich aus Grünalgen stammt. Dieses bemerkenswerte Protein öffnet, wenn es mit blauem Licht bestrahlt wird, einen Membrankanal, der positiv geladene Ionen in das betroffene Neuron einströmen lässt, woraufhin dieses ein elektrisches Signal erzeugt. Die von uns genutzte Variante des ChR enthielt darüber hinaus noch fluoreszierende Domänen, so dass die infizierten Zellen weiterhin aufleuchteten. Mit der solcherart verfeinerten Untersuchungsmethode konnten wir ganze neuronale Netzwerke dabei beobachten, wie sie bei bestimmten Aktivitäten der Maus feuerten. Außerdem konnten wir sie an- und ausschalten – und das für mehr als einen Monat nach der Infektion der Startneuronen.

Mittlerweile haben Neurowissenschaftler – mit Hilfe diverser Versionen des Delta-G-Rabies-Systems – zahlrei-

che Neuronennetze im Gehirn von Versuchstieren kartiert. Die Ergebnisse helfen zu verstehen, wie diese Netzwerke die Wahrnehmung und das Verhalten der Tiere beeinflussen. Ein Beispiel hierfür ist das visuelle System. Wenn Licht ins Auge einfällt, senden Neurone auf der Rückseite der Netzhaut, die »retinalen Ganglienzellen«, Signale ans Gehirn. Neurowissenschaftler nahmen lange Zeit an, dass diese Signale zunächst zu Zwischenstationen im Gehirn gelangen, um schließlich in der Hirnrinde anzukommen und dort verarbeitet zu werden. Ein Team um Botond Roska vom Friedrich Miescher Institute for Biomedical Research in Basel hat verfolgt, welchen Weg die Impulse von den retinalen Ganglienzellen bis zum Corpus geniculatum laterale (CGL) nehmen – einer Hirnregion, die bisher lediglich als Zwischenstation vor der Hirnrinde angesehen wurde.

Die Forscher um Roska fanden heraus, dass das CGL drei verschiedene Typen von Neuronen enthält, die visuelle Informationen offenbar auf verschiedene Weise verarbeiten. Weniger als ein Drittel der dort befindlichen Nervenzellen dienen tatsächlich als reine Zwischenstation, indem sie die Signale direkt an die Hirnrinde weiterleiten. Rund ein weiteres Drittel empfängt Kombinationen verschiedener Signale von einem Auge, die restlichen etwa 40 Prozent registrieren Impulse aus beiden Augen. Obwohl das CGL also eine frühe Station im visuellen System darstellt, verrechnen die meisten seiner Neurone bereits Informationen aus unterschiedlichen Quellen. Diese Erkenntnis wirft ein neues Licht darauf, wie das Gehirn visuelle Informationen interpretiert, die von der Netzhaut eintreffen.

Zwei Nervenzelltypen feuern versetzt – und helfen damit, Stürze zu vermeiden

An der Columbia University haben meine Kollegen und ich Neurone des Nucleus vestibularis lateralis (NVL) untersucht, einer Hirnregion, die für das Gleichgewichtsempfinden bedeutsam ist und uns vor Stürzen bewahrt. Stellen Sie sich vor, Sie stehen in einer fahrenden U-Bahn, die unerwartet stoppt. Noch bevor Sie die Situation gedanklich erfasst haben, machen Sie einen schnellen Schritt in Fahrtrichtung, spannen Ihre Beinmuskeln an und greifen reflexhaft nach der nächsten Haltestange, um die Bremswirkung zu kompensieren. Wie gelingt es dem Gehirn, dermaßen schnell genau die richtigen Muskelgruppen zu aktivieren?

Wir fanden heraus, dass der NVL von Mäusen zwei anatomisch unterscheidbare Neuronentypen aufweist, die beide stromabwärts mit verschiedenen Regionen des Nervensystems verbunden sind. Einige der dort befindlichen Zellen reagieren sehr rasch, wenn das Gehirn einen drohenden Sturz registriert; sie veranlassen die Beine, in eine Spreizstellung zu gehen. Etwas später werden andere Neurone aktiv und bewirken, dass sich die Muskeln rund um die Beingelenke versteifen. Bei Mäusen konnten wir Zellen beider Gruppen aktivieren, indem wir sie mit veränderten Tollwutviren infizierten und dann über ein Glasfaserkabel blaues Licht in den NVL einstrahlten. So gingen die Nager, sobald wir das Licht einschalteten, beispielsweise sofort in einen Spreizschritt, als wollten sie einen Sturz verhindern – selbst wenn sie stabil standen.

Ein Team um Nao Uchida von der Harvard University ist einer weiteren interessanten Frage nachgegangen: Welche Funktion haben Zellen, die den Neurotransmitter Dopamin ausschütten? Solche dopaminergen Neurone in zwei Hirnregionen, der Substantia nigra pars compacta (SNc) und der Area tegmentalis ventralis (ATV), helfen beim Verarbeiten von Belohnungsreizen. Sie werden unter anderem aktiv, wenn ein Versuchstier eine Leckerei bekommt oder wenn ein sensorischer Reiz anzeigt, dass es gleich eines bekommen wird – dies entspräche beim Menschen etwa dem Verzehr eines Schokoriegels beziehungsweise dem Knistern der Verpackung, wenn man ihn auswickelt. Um herauszufinden, welche Art von Information diese Neurone empfangen, ermittelten die Wissenschaftler um Uchida, wie jene Zellen mit anderen Hirnregionen vernetzt sind. Mit Hilfe des Delta-G-Rabies-Systems stellten sie fest: Dopaminerge Neurone in der SNc erhalten Informationen über die Bedeutung eines Reizes – also etwa darüber, ob das Knistern der Verpackung einen Schokoriegel ankündigt. Die Nervenzellen in der ATV hingegen bekommen Informationen über die Qualität einer Belohnung, beispielsweise darüber, wie gut der Schokoriegel schmeckt.

Bei Parkinsonpatienten gehen dopaminerge Neurone in der SNc zu Grunde. Uchida und seine Kollegen haben entdeckt, dass wichtige Eingangssignale dieser Zellen aus dem Nucleus subthalamicus stammen, einer kleinen linsenförmigen Hirnregion, die an der Steuerung von Körperbewegungen mitwirkt. Bei der so genannten Tiefenhirnstimulation reizt man den Nucleus subthalamicus mit Elektroden, was die Symptome der Parkinsonkrankheit abmildern kann. Es gibt aber noch andere Hirnbereiche, die Signale in die SNc senden, wie die Gruppe um Uchida gezeigt hat; möglicherweise kann auch deren elektrische Stimulation manchem Parkinsonpatienten Linderung verschaffen.

Das Zusammenspiel aus natürlicher Evolution und gezielter genetischer Veränderung hat uns Neurowissenschaftlern das Delta-G-Rabies-System an die Hand gegeben – ein enorm leistungsfähiges Werkzeug. Doch es lässt sich noch weiter verbessern. So erscheint es denkbar, ein Virus zu konstruieren, das stromabwärts wandert und somit klären helfen kann, welchen Weg die Ausgangssignale eines Neurons nehmen. Und vielleicht ist ja sogar ein Virus möglich, das nur aktive Verbindungen zwischen Nervenzellen aufspürt und so selektiv jene Netzwerke markiert, die lediglich an bestimmten Verhaltensweisen mitwirken. Auf jeden Fall ist es schon jetzt gelungen, ein Virus, das jahrtausendelang der Schrecken der Menschheit war, zu etwas Nutzbringendem umzuwandeln. ◂

QUELLEN

Ghanem, A., Conzelmann, K.K.: G Gene-Deficient Single-Round Rabies Viruses for Neuronal Circuit Analysis. In: Virus Research 216, S. 41–54, 2016

Watabe-Uchida, M. et al.: Whole-Brain Mapping of Direct Inputs to Midbrain Dopamine Neurons. In: Neuron 74, S. 858–873, 2012

Wickersham, I.R., et al.: Monosynaptic Restriction of Transsynaptic Tracing from Single, Genetically Targeted Neurons. In: Neuron 53, S. 639–647, 2007



GEOLOGIE

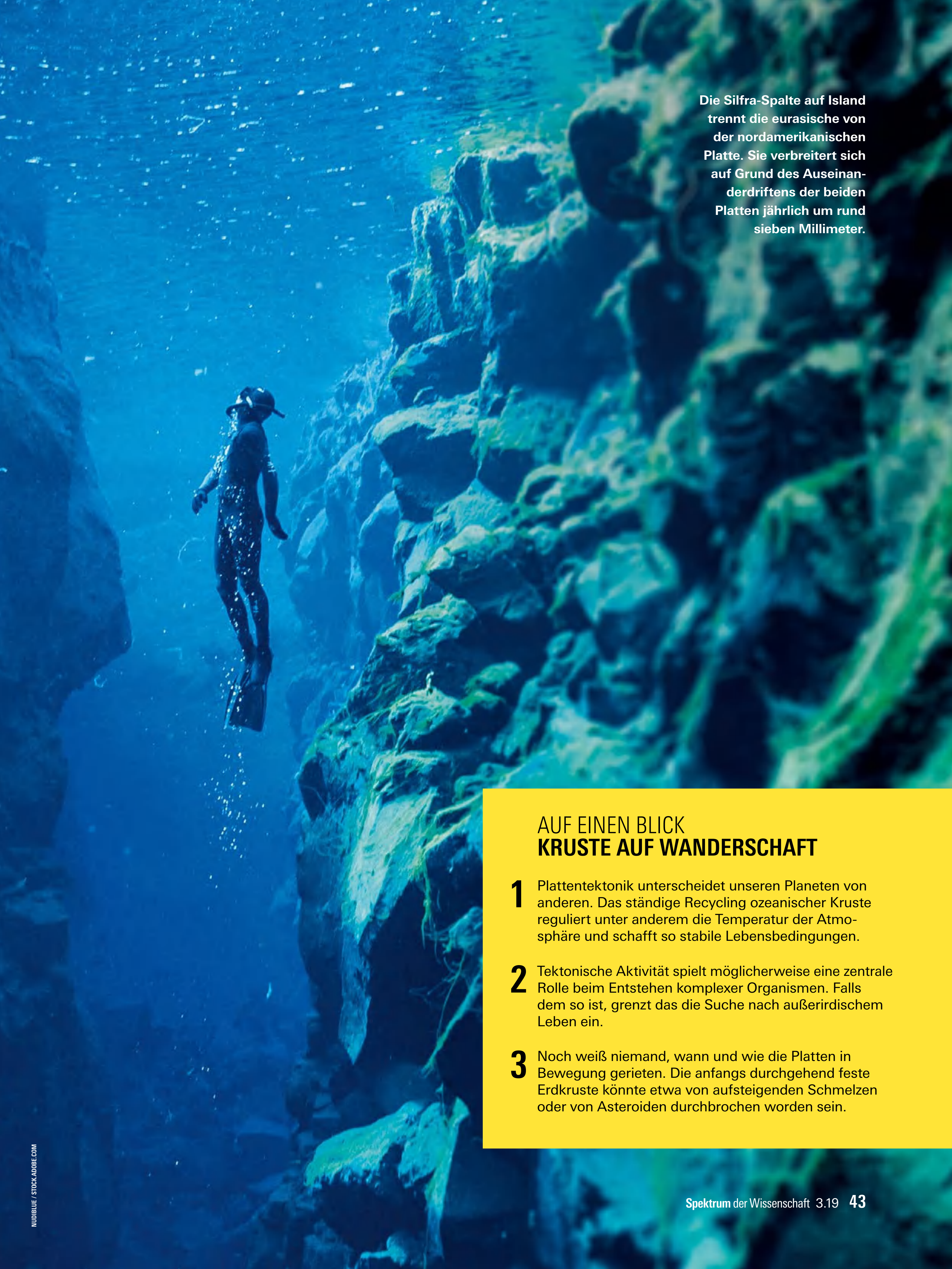
LEBEN DURCH PLATTENTEKTONIK

Jüngste Forschungsergebnisse legen nahe, dass Plattentektonik bei der Entwicklung des Lebens auf unserem Planeten eine entscheidende Rolle spielte. Das könnte auch für die Suche nach außerirdischen Lebensformen wichtig sein.

Rebecca Boyle ist eine preisgekrönte US-amerikanische Wissenschaftsjournalistin. Regelmäßig schreibt sie für namhafte Medien über Themen der Physik und Klimaforschung. Sie lebt in St. Louis, Missouri.

spektrum.de/artikel/1621164

NUDIBLUE / STOCK.ADOBE.COM



Die Silfra-Spalte auf Island trennt die eurasische von der nordamerikanischen Platte. Sie verbreitert sich auf Grund des Auseinanderdriftens der beiden Platten jährlich um rund sieben Millimeter.

NUDIBLUE / STOCK.ADOBE.COM

AUF EINEN BLICK
KRUSTE AUF WANDERSCHAFT

1 Plattentektonik unterscheidet unseren Planeten von anderen. Das ständige Recycling ozeanischer Kruste reguliert unter anderem die Temperatur der Atmosphäre und schafft so stabile Lebensbedingungen.

2 Tektonische Aktivität spielt möglicherweise eine zentrale Rolle beim Entstehen komplexer Organismen. Falls dem so ist, grenzt das die Suche nach außerirdischem Leben ein.

3 Noch weiß niemand, wann und wie die Platten in Bewegung gerieten. Die anfangs durchgehend feste Erdkruste könnte etwa von aufsteigenden Schmelzen oder von Asteroiden durchbrochen worden sein.

Auf der Erde gibt es sieben Kontinente, zwischen denen zum Teil ausgedehnte Wassermassen liegen. Unter dem Ozean erneuert sich die Oberfläche unseres Planeten permanent. Zahlreiche feste, kalte Platten gleiten auf dem heißen inneren Erdmantel, tauchen untereinander ab und kollidieren gelegentlich. Diese Plattentektonik unterscheidet die Erde von vielen anderen Planeten. In der Regel nehmen wir keine Notiz von dem Prozess – es sei denn, ein Erdbeben ereignet sich oder ein Vulkan bricht aus, wie der Kilauea auf Hawaii im Mai 2018.

Aber Plattentektonik ist mehr als Erdbeben oder Vulkanausbrüche. Viele Forschungsergebnisse deuten inzwischen darauf hin, dass die Bewegung der Erdkruste entscheidend sein könnte für ein weiteres wichtiges Merkmal der Erde: Leben zu beherbergen.

Dass die Erde eine bewegliche, sich stetig verändernde Kruste aufweist, könnte ein wesentlicher Grund dafür sein, dass sich auf ihr eine derartige Vielfalt an Organismen entwickelte. »Plattentektonik birgt den Schlüssel dafür, die Lebensfreundlichkeit unseres Planeten zu verstehen«, sagt die Geologin Katharine Huntington von der University of Washington. Die Frage lautet: Wie erschafft man einen bewohnbaren Planeten mit stabilen Lebensbedingungen für Milliarden von Jahren? »Die Verschiebung der Platten reguliert die Atmosphäre der Erde über sehr lange Zeiträume. Leben benötigt zudem Wasser und moderate Temperaturen«, erklärt Huntington.

In den zurückliegenden Jahren haben Geologen und Astrobiologen vermehrt Hinweise darauf gefunden, dass Plattentektonik unserem Planeten eine Reihe besonderer Eigenschaften verleiht. Demnach bestimmt das Recycling der Erdkruste die Langlebigkeit, Zusammensetzung und Temperatur der Atmosphäre. Der Ozean existierte vielleicht nicht, wenn nicht regelmäßig Wasser in den Erdmantel eindränge und wieder freigesetzt würde. Plattentektonik bestimmt den Verlauf von Küstenlinien und beeinflusst die Stärke der Gezeiten. Ohne sie wären die Meere womöglich arm an Nährstoffen und damit an Leben. Gäbe es keine Subduktion – das Abtauchen einer Erdplatte unter eine andere –, dann wäre der Meeresgrund kalt und chemisch weniger komplex, und unter Umständen hätte Leben hier nie Fuß gefasst. Einige Forscher spekulieren, ohne Plattentektonik hätten sich keine höheren Organismen entwickelt. James Dohm und Shigenori Maruyama vom Tokyo Institute of Technology schlugen 2015 einen Begriff vor, der dieses Abhängigkeitsverhältnis zusammenfassen soll: die »Habitable Trinity« (bewohnbare Dreiheit). Er beschreibt einen Planeten, auf dem es als wichtige Voraussetzungen für Leben reichlich Wasser, eine Atmosphäre und Landmassen gibt – die alle im Austausch miteinander stehen.

Um jedoch zu begreifen, wie Plattentektonik die Entwicklung von Leben beeinflusst und ob sie dafür notwendig ist, bedarf es einer Antwort auf eine der am heißesten diskutierten Fragen der Geowissenschaften: wie und wann die Platten sich in Bewegung gesetzt haben. Wenn Geologen entschlüsselten, warum die Erde eine mobile Kruste hat, würde uns das auch etwas über andere Planeten und Monde verraten und darüber, ob diese ebenfalls Leben beherbergen könnten.

Im Jahr 2012 tauchte der Filmemacher James Cameron mit dem U-Boot »Deepsea Challenger« zum tiefsten Punkt des Ozeans hinab – als erster Mensch, der das in einem Solo-Tauchgang tat. In 10984 Meter Tiefe setzte er im Marianengraben, einer Spalte zwischen zwei konvergierenden Platten, auf dem Meeresgrund auf. Cameron sammelte Proben in dem Graben, darunter Belege für Leben an den Nahtstellen des Planeten.

Während dort die pazifische Platte in den Erdmantel absinkt, heizt sie sich auf, so dass im Gestein enthaltenes Wasser herausgepresst wird. In einem Prozess, den man Serpentinisierung nennt, entweicht Wasser aus der Platte und verändert die physikalischen Eigenschaften des oberen Mantels. Das setzt Methan und andere Verbindungen frei, die an heißen Quellen am Grund in den Ozean strömen.

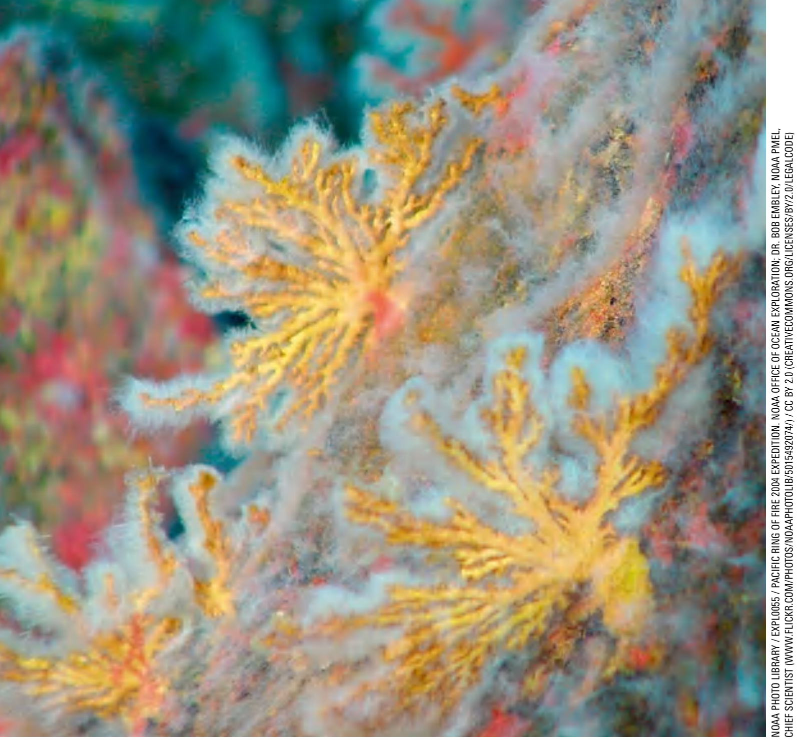
Leben in völliger Dunkelheit und unter riesigem Druck

Ähnliche Prozesse könnten auf der frühen Erde die Zutaten für einen einfachen Stoffwechsel und damit die Basis für die ersten sich teilenden Zellen geliefert haben. Cameron brachte Belege für moderne Nachfahren solcher Zellen mit nach oben: mikrobielle Matten (Ansammlungen von Bakterien), die in mehr als zehn Kilometer Tiefe gedeihen, und zwar in totaler Finsternis und bei einem rund 1000-fach höheren Druck, als an der Oberfläche herrscht. »Der Fund ist deswegen so aufregend, weil er Plattentektonik und Leben miteinander verknüpft«, sagt Keith Klepeis, Geologe an der University of Vermont. »Er liefert Hinweise darauf, wonach wir an anderen Orten im Universum suchen müssen und wie frühe Lebensformen auf der Erde ausgesehen haben können.«

Der Rekordtauchgang des Filmemachers war nicht die einzige Expedition, die eine Verbindung zwischen Plattentektonik und Leben im Meer aufzeigte. Jüngste Ergebnisse deuten auf einen Zusammenhang zwischen tektonischer Aktivität und der so genannten kambrischen Explosion vor etwa 540 Millionen Jahren hin, als in einem geologisch sehr kurzen Zeitraum von vielleicht fünf bis zehn Millionen

Die Lava des hawaiianischen Vulkans Kilauea zerstörte im Frühjahr und Sommer 2018 dutzende Häuser. Den Vulkan speist ein so genannter Hotspot im Erdmantel, der alle Hawaii-Inseln hervorgebracht hat.


U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS)



Bakterienmatten (weiß) überziehen gelbe Korallen nahe dem Unterwasservulkan East Diamante im Pazifik. Die Mikroorganismen nutzen die chemische Energie hydrothermaler Quellen.

Jahren diverse Vertreter fast aller heutigen Tierstämme entstanden.

Im Dezember 2015 veröffentlichten australische Forscher eine Studie, in der sie zirka 300 Sedimentkerne aus Meeresböden rund um den Globus analysierten. Einige enthielten Schichten, die mehr als 700 Millionen Jahre alt waren. In den Proben bestimmten die Wissenschaftler die Menge an Phosphaten sowie an essenziellen Spurenelementen wie Kupfer, Zink, Selen und Kobalt. Dort, wo diese Nährstoffe im Ozean reichlich vorhanden sind, treiben sie das Wachstum von Bakterien oder Mikroalgen kräftig an. Das Team um Ross Large von der University of Tasmania fand Belege dafür, dass sich die Menge an Nährstoffen zwischen 560 und 550 Millionen Jahren vor heute etwa verzehnfachte.

Als treibende Kraft dahinter vermuten Large und seine Kollegen die Plattentektonik. Wenn Kontinentalplatten zusammenstoßen und Gestein in die Höhe schieben, entstehen Berge. Dort ist das Material den Witterungsbedingungen ausgesetzt. Durch Verwitterung lösen sich Nährstoffe aus Bergregionen und werden ins Meer gespült.

Vielleicht noch überraschender ist die Beobachtung der Wissenschaftler, dass die analysierten Elemente in jüngeren Zeitaltern, als es zu Massenaussterben auf der Erde kam, in deutlich geringeren Konzentrationen vorlagen. In von Nährstoffarmut geprägten Phasen wurden Phosphate und Spurenelemente offenbar schneller verbraucht, als geochemische Prozesse sie wieder zuführen konnten, so Large.

Eine wichtige Rolle spielt die tektonische Aktivität auch für die recht stabile globale Mitteltemperatur auf der Erde, indem sie die CO_2-Konzentration über hunderte Millionen Jahre hinweg reguliert. Wäre der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre etwa so hoch wie auf der Venus (96,5 Prozent), ähnelte unser Planet einem Glutofen.

Die gleichen Verwitterungsprozesse, die Nährstoffe aus Felsgestein lösen und in den Ozean transportieren, helfen, CO_2 aus der Atmosphäre zu entfernen. Zunächst reagiert das Gas mit Wasser in der Atmosphäre zu Kohlensäure, die dafür sorgt, dass sich Gestein schneller auflöst und verwittert. Mit dem Regen gelangen Kohlensäure und Kalziumionen aus dem Gestein ins Meer. Gleichzeitig löst sich atmosphärisches CO_2 direkt im Ozean. Dort verbinden sich Kohlensäure und Kalzium (Ca) zu Kalkstein ($CaCO_3$), der sich am Meeresboden ablagert. Im Lauf von Millionen Jahren verschwindet das $CaCO_3$ mit abtauchenden Platten im Erdmantel. Auf diese Weise bleibt der CO_2-Gehalt der Atmosphäre über sehr lange Zeiträume relativ konstant.

Plattentektonik könnte auch für ein weiteres, lebenswichtiges Gas verantwortlich sein: Sauerstoff. Ganze zwei Milliarden Jahre vor der kambrischen Explosion, im Archaikum, war unsere Atmosphäre nahezu frei davon. Als die ersten Algen vor 2,5 Milliarden Jahren anfingen, Fotosynthese zu betreiben, und dabei Sauerstoff produzierten, wurde dieser überwiegend von eisenhaltigem Gestein als Eisenoxid gebunden. Einer Studie aus dem Jahr 2016 zufolge setzte die Plattentektonik einen zweistufigen Prozess in Gang, der die Atmosphäre mit Sauerstoff anreicherte: Zuerst sorgten Subduktionsprozesse dafür, dass sich der obere Erdmantel differenzierte und ozeanische und kontinentale Kruste entstanden. Letztere enthält weniger eisenreiches und mehr quarzreiches Gestein, das nicht mit Sauerstoff reagiert. Anschließend beförderten Regen und Gesteinsverwitterung mehr Kohlensäure und CO_2 in den Ozean. Das kurbelte das Algenwachstum an, so dass der Sauerstoffgehalt im Meer und in der Atmosphäre stieg und es vor einer halben Milliarde Jahren schließlich zur kambrischen Explosion kam.

Eine Erde voller Schnee und Eis

Wann genau Plattentektonik auf der Erde einsetzte, ist unter Wissenschaftlern umstritten. Robert Stern, Geologe an der University of Texas in Dallas, vermutet, dass sich die Platten zwischen einer Milliarde und 540 Millionen Jahren vor heute in Bewegung setzten, im Neoproterozoikum. In dieses Erdzeitalter fällt eine Phase ungewöhnlich starker globaler Abkühlung, die dazu geführt haben könnte, dass die Meere weitgehend zufroren und Gletscher bis an den Äquator reichten – Klimaforscher sprechen von der Hypothese der »Schneeballerde«. Ende 2017 publizierten Stern und Nathaniel Miller von der University of Texas in Austin einen Artikel, in dem sie postulierten, Plattentektonik habe die Landmassen so umverteilt, dass dies katastrophale Folgen für den Ozean und die Atmosphäre zeitigte: ein Vereisen der Erde. Und das, so Sterns Argumentation, habe entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung des Lebens auf unserem Planeten gehabt.

»Die räumliche Trennung von Populationen ist ein wesentlicher Vorgang beim Entstehen neuer Arten«, sagt Stern, »und hier kommt die Plattentektonik ins Spiel: Wenn Kontinente auseinanderbrechen und sich Landmassen sowie Festlandssockel woanders neu zusammenfügen, dann treffen unterschiedlichste Spezies aufeinander, was den zwischenartlichen Konkurrenzkampf intensiviert.«

Er meint zudem, Plattentektonik könnte eine Voraussetzung für das Entstehen höher entwickelter Organismen gewesen sein. Sie erlaube das dauerhafte Bestehen von Festländern und ermögliche somit, dass Landlebewesen unterschiedlichste Gliedmaßen hervorbringen – unter anderem solche mit Händen, um Objekte greifen oder bearbeiten zu können. Stern ist davon überzeugt, ein Planet mit Meeren, Kontinenten und Plattentektonik begünstige die Entstehung neuer Arten, die dann der natürlichen Selektion unterliegen. »Leben kann ohne Plattentektonik entstehen. Aber ich glaube nicht, dass ohne sie der Mensch aufgetaucht wäre«, meint er.

Sterns Hypothese steht und fällt jedoch damit, wann genau dieser Prozess einsetzte. Und das ist eine der großen offenen Fragen der Geologie. Die Erde entstand vor zirka 4,54 Milliarden Jahren und war zunächst ein glühender Ball aus geschmolzenem Gestein. Es dauerte womöglich mindestens eine Milliarde Jahre, ehe sie hinreichend abgekühlt war und sich erste Platten in Bewegung setzten, erläutert der Planetenforscher Craig O'Neill von der Macquarie University in Sydney.

Im Innern der Erde herrschen Konvektionsströme, die Wärme und geschmolzenes Gestein transportieren. Material, das in den Erdmantel eindringt, wird zusammengepresst und auf dem Weg in die Tiefe immer stärker erhitzt. Irgendwann steigt es wieder auf und kühlt dabei ab. Dadurch nimmt seine Dichte zu, und es sinkt erneut hinab. Lavalampen funktionieren nach dem gleichen Prinzip.

Diese vertikale Bewegung des Mantelgesteins fand auch auf der frühen Erde statt. Der Mantel war zu jener Zeit jedoch weniger zähflüssig als heute und konnte daher nicht die notwendige Kraft erzeugen, um die feste Kruste aufzubrechen, so O'Neill.

»Es herrschte damals weder eine horizontale Plattenbewegung noch Subduktion«, erläutert Klepeis. »Auf der frühen Erde gab es keine Kontinente, und die Erdoberfläche war eine zusammenhängende äußere Hülle ohne Bruchzonen.« Geologen bezeichnen diesen Zustand als stagnierenden Deckel (stagnant lid).

Eine Vulkanwelt vor langer Zeit?

O'Neill veröffentlichte 2016 eine Studie, die zeigt, dass die junge Erde dem Jupitermond Io geglichen haben könnte. »Dort findet man vulkanische Aktivität, aber kaum horizontale Bewegung an der Oberfläche«, sagt er. Erst als unser Planet begonnen habe, sich abzukühlen, habe die Plattentektonik eingesetzt.

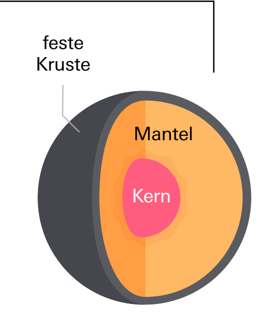
Bleibt die Frage, was den »Deckel« aufbrach und die ersten Platten schuf. Einige Wissenschaftler nehmen an, die Einschläge von Himmelskörpern seien der Auslöser gewesen. Ihrer Ansicht zufolge könnten Asteroiden, die nach der Geburt des Sonnensystems durchs All rasten, auf unserem Planeten eingeschlagen haben und dabei die Erdkruste in Bewegung gesetzt haben. 2017 schlugen O'Neill und seine Kollegen in einer Veröffentlichung vor, dass ein Asteroidenbeschuss rund eine halbe Milliarde Jahre nach Entstehen der Erde Subduktionsprozesse eingeläutet haben könnte, indem er Teile der erkalteten äußeren Kruste in den heißen oberen Mantel drückte.

Ein Jahr zuvor hatten Maruyama und andere Forscher bereits spekuliert, Asteroiden hätten nicht nur die notwendigen Impulse hierfür geliefert, sondern auch Wasser mit sich geführt und das Krustengestein damit geschwächt. Vielleicht hat aber unser Planet diesen Anstoß gar nicht benötigt. Die Platten könnten auch einfach so entstanden sein, während die junge, heiße Erde abkühlte.

Vor drei Milliarden Jahren gab es auf der Erde möglicherweise bereits regionale tektonische Aktivität, die geologisch betrachtet eher kurzlebig war. Irgendwann könnten kältere Teile der Kruste in den Mantel abgesunken sein und so die

Warum brach die Erdkruste auf?

Kurz nach der Entstehung unseres Planeten bildete sich eine feste Kruste um seinen flüssigen Mantel. Irgendwann zerbrach diese Hülle, und die Plattentektonik setzte ein. Forscher haben verschiedene Thesen, wie es dazu kam.



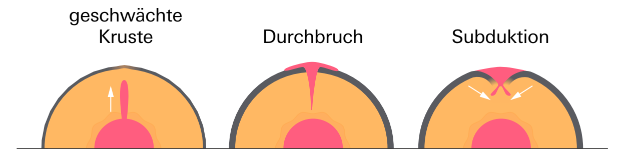
Abkühlen und Zersplittern

Während die junge, heiße Erde allmählich abkühlte, könnten kältere Teile der Kruste in die Tiefe gesunken sein. Dabei trennten sich Lithosphärenplatten voneinander, und Subduktion setzte ein: das Abtauchen einer Platte unter eine andere.



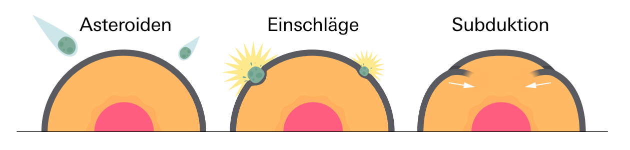
Aufsteigen und Durchbrechen

Gesteinsschmelzen aus dem Erdmantel könnten aufgestiegen sein, die Erdkruste von unten geschmolzen und schließlich durchbrochen haben. An den Bruchstellen entstanden Subduktionszonen.



Aufprallen und Durchschlagen

Asteroiden könnten die Erdkruste durchschlagen und kalte Krustenstücke in den heißen oberen Mantel gedrückt haben, was dann tektonische Prozesse auslöste.



LUCY READING-IKKANDA / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

angrenzende Kruste geschwächt haben. Geschah das wiederholt, könnten sich an diesen Stellen Plattengrenzen gebildet und Prozesse der globalen Plattentektonik eingesetzt haben. So zumindest beschrieben es David Bercovici von der Yale University und Yanick Ricard von der École normale supérieure de Lyon 2014 in einem Fachartikel.

Vielleicht passierte aber auch das genaue Gegenteil: Statt dass kalte Kruste ins Innere der Erde drang, könnten Gesteinsschmelzen im Mantel aufgestiegen und die Kruste aufgebrochen haben. Einen entsprechenden Mechanismus stellten Stern und Scott Whattam von der King Fahd University of Petroleum and Minerals 2015 in einer Studie vor.

Laut all diesen Theorien gab es auf der jungen Erde anfangs immer wieder vorübergehend tektonische Aktivität, die dauerhaft erst vor rund drei Milliarden Jahren Fahrt aufnahm. Die Belege hierfür sind allerdings noch sehr lückenhaft. Ozeanische Kruste beispielsweise ist höchstens 200 Millionen Jahre alt, erlaubt also keine Einblicke in die Frühzeit der Erde.

Analysen der ältesten Gesteine der Erde legen immerhin nahe, dass bereits vor etwa vier Milliarden Jahren Prozesse stattgefunden haben könnten, die der Subduktion ähnelten. Zwischen drei und zwei Milliarden Jahren vor heute veränderte sich die chemische Zusammensetzung des Erdmantels, was auf die Abkühlung des Planeten zurückzuführen ist. Denn infolge der Abkühlung veränderten sich die Konvektionsströme im Mantel. Vielleicht setzte damals die irdische Plattentektonik verbreitet ein.

Unvergleichlicher Heimatplanet

Ist tektonische Aktivität also die Voraussetzung für Leben? Die Frage lässt sich nur schwer beantworten, weil wir keine Vergleiche haben. Wir kennen lediglich einen Planeten mit flüssigem Wasser, sich bewegenden Platten und einer unüberschaubaren Zahl von Organismen. Auf anderen Planeten oder Monden mögen Prozesse stattfinden, die der Plattentektonik ähneln, aber nichts davon kommt dem nahe, was auf der Erde passiert.

Der Saturnmond Enceladus zum Beispiel weist tiefe Spalten in seiner vereisten Oberfläche auf, aus denen Wasserdampf und andere Gase ins All entweichen. Die Oberfläche der Venus wiederum ist offenbar nicht älter als 500 Millionen Jahre, obwohl es hier keine Platten gibt. Und auf dem Mars befindet sich mit Olympus Mons der größte Vulkan im gesamten Sonnensystem, dessen tektonische Geschichte ein Mysterium ist. Der Vulkan liegt in einer riesigen Region namens Tharsis, welche die planetare Kruste allein durch ihr Gewicht so weit heruntergedrückt haben könnte, dass die Pole des Himmelskörpers anfingen, sich zu verschieben.

O'Neill hat eine Studie veröffentlicht, nach der ein Planet von der Größe des Mars mit reichlich Wasser einen tektonisch aktiven Zustand erreichen könnte. Einige Wissenschaftler meinen, bestimmte Regionen auf der Südhalbkugel des Mars könnten einer ozeanischen Spreizungszone ähneln. Aber der Planet weist seit wenigstens vier Milliarden Jahren keine tektonische Aktivität (mehr) auf, da sind die Forscher sicher. Denn so alt ist die Marskruste laut Daten von Weltraumsonden und Rovern auf der Oberfläche.



NASA EARTH OBSERVATORY, ROBERT SIMMON

Die Sonde InSight, die am 26. November 2018 auf dem Roten Planeten landete, soll helfen, seine Geologie besser zu verstehen. Sie hat drei Instrumente an Bord, welche die Dicke und die Zusammensetzung der Kruste, des Mantels und des Kerns des Planeten bestimmen werden, um Hinweise darauf zu erhalten, ob er tatsächlich vor langer Zeit tektonisch aktiv war.

Während Geologen über den Ursprung der Plattentektonik auf der Erde vorerst weiter debattieren, gehen sie davon aus, dass der Prozess auch hier irgendwann zum Erliegen kommen wird. Denn er ist vermutlich nur ein Übergangsstadium. Planeten könnten verschiedene Entwicklungsstufen durchlaufen – von einem heißen Ball mit einer starren Oberfläche hin zu einem warmen mit beweglichen Platten und schließlich zu einem kalten mit einer erneut starren Kruste. Viele Geologen sind überzeugt davon, der Mars sei auf Grund seiner geringeren Größe deutlich schneller abgekühlt als die Erde und seine Oberfläche deshalb schon lange tektonisch inaktiv.

Früher oder später wird auch unseren Planeten dieses Schicksal ereilen. Ob es dann noch Lebensformen geben wird, die ihn besiedeln und von schwindelnden Höhen bis in kilometertiefe Gesteinsspalten und bis zum Grund der Ozeane zu finden sind, ist eine andere Frage. ◂

QUELLEN

Dohm, J.M., Maruyama, S.: Habitable Trinity. In: Geoscience Frontiers 6, S. 95–101, 2015

O'Neill, C. et al.: A Window for Plate Tectonics in Terrestrial Planet Evolution? In: Physics of the Earth and Planetary Interiors 255, S. 80–92, 2016

O'Neill, C. et al.: Impact-Driven Subduction on the Hadean Earth. In: Nature Geoscience 10/2017, S. 793–797

Stern, R.J., Miller, N.R.: Did the Transition to Plate Tectonics Cause Neoproterozoic Snowball Earth? In: Terra Nova 30, S. 87–94, 2018

Turner, S. et al.: Heading down Early on? Start of Subduction on Earth. In: Geology 42, S. 139–142, 2014

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Why Earth's Cracked Crust May Be Essential for Life« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



SCHLICHTING!
UNSICHTBAR VERGITTERT



Vögel nehmen im Gegensatz zu Menschen ultraviolettes Licht wahr. Das könnte dabei helfen, spiegelnde Fensterfronten für sie als gefährlich zu markieren – ohne dass die Maßnahme unsere Sicht trübt.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

spektrum.de/artikel/1621166

Alles Sichtbare ist nur die äußere Gestalt, in die sich ein Unsichtbares hüllt
Gertrud von Le Fort (1876–1971)

Fenster schützen uns vor Wind, Regen, Kälte sowie Schall, und sie sind praktischerweise durchsichtig, ohne ganz unsichtbar zu sein: Die Scheiben reflektieren einen Teil des auftreffenden Lichts. Diese segensreiche Eigenschaft bewahrt uns meist davor, gläserne Türen einzurennen. Dennoch passieren Unfälle, und zwar nicht allein aus Unachtsamkeit, sondern oft wegen optischer Fehleinschätzungen. Vögel sind dafür besonders anfällig.

Wenn Räume tagsüber unbeleuchtet sind, verliert sich darin das einfallende Licht weitgehend, weil die Einrichtungsgegenstände es auf Grund zahlreicher Wechselwirkungen absorbieren. Nur äußerst wenig verlässt den Raum wieder durch das Fenster. Dann sieht man von außen vor allem das Licht der hellen Umgebung, das direkt an den Scheiben reflektiert wird.

Erwachsene Menschen erkennen den virtuellen Charakter der so entstehenden Spiegelwelt meist rechtzeitig. Für durch den Himmel flitzende Vögel hingegen dürfte sich das Bild im Fenster oft bis zum allerletzten Moment kaum von der normalen Umwelt unterscheiden (siehe Foto rechts). Auch wenn das Licht des Innenraums das reflektierte Licht der Außenwelt überlagert, wird das für Vögel schwer einzuordnen sein. Die Tiere prallen daher nicht selten mit voller Wucht gegen Fenster und verletzen sich dabei häufig tödlich.

Gelegentlich versuchen die Bewohner, mit aufgeklebten Raubvogelsilhouetten vom virtuellen Raum hinter der Scheibe abzuschrecken (siehe unteres Foto rechte Seite). Untersuchungen zeigen aber: Die Maßnahme ist nahezu nutzlos. Andere Strategien, mit denen sich die Fenster effektiver maskieren ließen, scheitern meist aus ästhetischen Gründen.



H. JOACHIM SCHLICHTING

Die gespiegelte Welt hinter den Scheiben lädt Vögel zum Hindurchfliegen ein. Ausgerechnet die geöffneten Fenster wirken hingegen wie eine schwarze Wand.

In der Natur gibt es eine besondere Art durchsichtiger Barriere, die dabei helfen könnte, das Problem zu lösen. Wer durch Lücken zwischen Büschen und Bäumen geht, wird häufig von klebrigen Fäden geradezu eingesponnen. Dort bauen Spinnen gern ihre Netze, schließlich nutzen Insekten bevorzugt solche Schneisen. Man sieht die aufwändigen, filigranen Gebilde lediglich im Gegenlicht oder wenn sie von Tröpfchen benetzt sind. Doch obwohl Vögel wie die Spinnen zwischen Gestrüpp nach Insekten jagen, kommen zerstörerische Durchflüge selten vor. Sie bemerken die Fäden und meiden sie – vermutlich ist auch ihnen die Anhänglichkeit lästig.

Erkennen die Vögel etwa mehr als wir Menschen? Tatsächlich können viele Vögel nicht nur das für uns sichtbare Spektrum, sondern darüber hinaus ultraviolettes Licht wahrnehmen (»Vögel sehen die Welt bunter«, **Spektrum** Januar 2007, S. 96). Spinnfäden werfen UV-Strahlung zurück, und da der Hintergrund diese meistens absorbiert, zeichnen sich die Netze davor deutlich ab. Spinnen dekorieren sie oft sogar regelrecht mit reflektierenden Elementen (siehe Foto rechts oben). Der Grund dafür ist unter Wissenschaftler noch umstritten, aber vermutlich stellt der bessere Schutz vor der Zerstörung durch Vögel nur einen günstigen Nebeneffekt dar. Biologen gehen eher davon aus, dass die Hauptfunktion des UV-Anstrichs darin besteht, Insekten ins Netz zu locken, die ebenfalls diesen Bereich des Spektrums sehen können und davon regelrecht angezogen werden. Die unterschiedliche visuelle Wahrnehmung von Menschen und Vögeln erlaubt es möglicherweise, Letztere besser vor Kollisionen mit Fensterscheiben zu schützen, ohne Ersteren den Durchblick zu rauben.

Die Zusammenstöße mit Glasflächen sprechen dafür, dass Vögel die dort hervorgerufene Spiegelwelt als einigermaßen realistisch empfinden. Tatsächlich reflektiert das übliche Fensterglas auch einen Teil des UV-Lichts. Um die Scheiben für die Vögel als Hindernis erscheinen zu lassen, könnte man sie mit Streifen oder komplexeren Mustern versehen, die UV-Strahlung absorbieren und daher von den Vögeln erfasst werden. Sofern diese Materialien für Menschen transparent sind, würden wir selbst keine visuellen Einschränkungen bemerken.



Einige Spinnenarten, hier eine Wespenspinne, dekorieren ihre Netze mit dickeren Fäden. Diese reflektieren ultraviolettes Licht besonders gut.

AEE_WERAWAN / GETTY IMAGES / ISTOCK



Aufkleber von Vogelsilhouetten verhindern die Durchflugsversuche der Vögel nicht.

H. JOACHIM SCHLICHTING

Es gibt am Markt bereits zahlreiche Varianten von Hindernissen, welche für uns praktisch durchsichtig sind und die spezielle Wahrnehmung der Vögel ausnutzen. Sie reichen von bloßen Aufklebern über Sprays bis hin zu permanenten Maßnahmen bereits während der Produktion des Fensterglases. Anders als die nutzlosen Raubvogelsilhouetten sind die Hilfsmittel allerdings einerseits noch nicht verbreitet, andererseits gibt es bislang auch keine verlässlichen Erhebungen zu ihrer tatsächlichen Wirkung. Erschwerend kommt hinzu, dass nicht jede Vogelart UV-Strahlung gleich gut erkennt und es abhängig vom Umgebungslicht Situationen gibt, in denen solche Wellenlängen von vornherein kaum vorkommen.

Darum empfehlen Naturschutzorganisationen für einen sicheren Schutz vor Vogelschlag weiterhin, Fenster mit im ganzen Spektrum sichtbaren Mustern in etwa handflächenbreiten Abständen optisch zu vergittern. Wo man das aus ästhetischen Gründen nicht möchte, scheinen UV-absorbierende Markierungen aber immerhin viel versprechend. Der in jeder Hinsicht einfachste Ansatz besteht im Nichtstun: Selteneres Fensterputzen verringert die Reflexe, weil sich absorbierender Staub und Pollen sammeln. Je mehr wir uns hingegen um makellose Glasfronten im Stadtbild bemühen, desto öfter müssen wir den Tod von Vögeln in Kauf nehmen, die Fenster nicht als Hindernis, sondern als Durchflugsöffnung wahrnehmen. ◂

QUELLEN

Buer, F., Regner, M.: Mit »Spinnennetz-Effekt« und UV-Absorbern gegen den Vogeltod an transparenten und spiegelnden Scheiben. In: Vogel und Umwelt 13, S. 31–41, 2002

Håstad, O., Ödeen, A.: A Vision Physiological Estimation of Ultraviolet Window Marking Visibility to Birds. In: PeerJ 2, e621, 2014



MATERIALWISSENSCHAFT

EIN WUNDERSTOFF WIRD ENTZAUBERT

Graphen sollte das neue Silizium werden. Die Geschichte eines Goldrauschs – mit unerwarteter Wendung.

Anna Clemens ist promovierte Materialwissenschaftlerin und Wissenschaftsjournalistin in Prag.

spektrum.de/artikel/1621168

Der Goldrausch beginnt mit einem Stück Tesafilm. Sorgfältig haben Andre Geim und sein Doktorand Konstantin Novoselov etliche Stücke davon abgeschnitten. Eigentlich ist schon Feierabend, aber die beiden Forscher haben es sich zur Gewohnheit gemacht, freitags länger zu arbeiten. Die Zeit nutzen sie, um in ihrem Labor an der University of Manchester eher spekulativen Ideen nachzugehen.

An diesem Abend im Jahr 2002 pappen Geim und Novoselov ein Stück Tesafilm auf einen dunklen Graphitblock und reißen es blitzschnell wieder herunter. Dann nehmen sie einen anderen Streifen, kleben ihn auf den ersten und ziehen ihn erneut ab. Ratsch, ratsch, ratsch.

Die beiden Forscher wollen so möglichst dünnes Graphit herstellen. Das gräulich-schuppige Mineral besteht aus einem dreidimensionalen Kohlenstoffgitter, dessen Atome jeweils drei sehr robuste Bindungen mit Partnern in derselben Gitterebene eingehen. Zwischen den einzelnen Schichten wirkt nur die schwache Van-der-Waals-Anziehung. Das macht Graphit weniger stabil als Diamant, in dem die Kohlenstoffatome nicht in Schichten angeordnet sind, sondern mit jeweils vier Nachbarn räumlich verknüpft sind. Dennoch gehören Graphitkristalle zu den widerstandsfähigeren Materialien, die Menschen ohne allzu großen Aufwand aus der Erde lösen können. Bereits in der späten Eisenzeit vor 2400 Jahren sollen unsere Vorfahren Töpfe damit feuerfest gemacht haben. Bis heute steckt Graphit in den Minen von Bleistiften.

Graphit und Diamant sind keineswegs die einzigen Formen von Kohlenstoff: Man kann C-Atome auch dazu bringen, sich zu fußballförmigen Molekülen zusammenzuschließen, so genannten Fullerenen. In anderen Situationen bilden die Atome gar tunnelartige Strukturen, Experten sprechen von Kohlenstoffnanoröhren.

Im Jahr 2002 sind Geim und Novoselov einer weiteren Variante auf der Spur. Sie müsste man erhalten, wenn man die oberste Schicht von Graphit abtrennt. Damit bekäme man eine ebene, lediglich ein Atom dicke Lage aus Kohlenstoff. Theoretische Überlegungen zu diesem »Graphen« gibt es schon lange. Die gebürtigen Russen, die in England forschen, wollen den ultradünnen Stoff nun erstmals isolieren.



STANISLAV CHUB / STOCK.ADOBE.COM

In Graphen ordnen sich Kohlenstoffatome (schwarz) wie in einer Bienenwabe an. Die Bindungen zwischen ihnen sind auf diesem Bild als goldene Stäbe dargestellt. Wie wertvoll Graphen wirklich ist, muss sich noch zeigen.

AUF EINEN BLICK
STOFF SUCHT ANWENDUNG

1 Extrem dünne Schichten aus Kohlenstoff haben verblüffende Eigenschaften, unter anderem sind sie sehr stabil und leiten Strom extrem gut.

2 Weltweit, auch in Europa, wurden enorme Summen in die Erforschung von Graphen investiert. Eine revolutionäre Anwendung ist jedoch nicht in Sicht.

3 Graphen gilt immerhin als wichtiger Prototyp für die Klasse zweidimensionaler Materialien. Diese könnten die Mikroelektronik entscheidend verbessern.

Geim und Novoselov vermuten, dass man einige Fitzelchen Graphen bereits mit einfachem Klebeband von einem Graphitblock lösen kann. Auf die Idee hat die beiden ein Kollege gebracht, der auf diese Weise die Oberfläche eines Graphitstücks reinigte. Nach einigen Tagen spielerischer Tests bleibt am Tesafilm der Forscher eines Abends tatsächlich Graphen haften, wie sie unter dem Mikroskop feststellen.

Der Traum von einer Materialrevolution

Die Entdeckung beschert Geim und Novoselov im Jahr 2010 den Physik-Nobelpreis. Und sie löst einen Boom aus, wie ihn die Materialwissenschaft noch nicht gesehen hat. Denn Graphen hat herausragende Eigenschaften: Das hauchdünne Gitter aus perfekt angeordneten C-Atomen ist transparent, extrem stabil, biegsam und widerstandsfähig. Ein Wundermaterial, schwärmen Forscher und Analysten.

Schnell machen sich große Hoffnungen breit: Graphen könnte eine Revolution ganzer Industriezweige herbeiführen. Es könnte schnellere Prozessoren, faltbare Telefone, transparente Solarzellen und ultraleichte Flugzeuge ermöglichen. In Investorenkreisen gilt Graphen bald als das Gold des 21. Jahrhunderts. Seitdem sind weltweit enorme Geldbeträge in die Erforschung des einlagigen Kohlenstoffs geflossen. Aber bis heute lässt der große kommerzielle Durchbruch auf sich warten. Mancher Experte fragt sich mittlerweile, ob das Wundermaterial wirklich so wegweisend ist wie vermutet. Andere plädieren für Geduld: Oft folgt Wissenschaft ihrem eigenen Zeitplan – und führt zu überraschenden Erkenntnissen, wenn man schon gar nicht mehr damit rechnet.

Vieles davon können Geim und Novoselov noch nicht ahnen, als sie im Herbst 2004 ihre Messungen veröffentlichen. Fasziniert sind die Wissenschaftler vor allem von der elektrischen Leitfähigkeit des Graphens: Elektronen fließen praktisch mühelos durch den Maschendrahtzaun aus Kohlenstoff. Das macht das Material zu einem deutlich besseren Stromleiter als beispielsweise Kupfer.

Auch deshalb stürzen sich in den darauf folgenden Jahren immer mehr Forschungslabore auf den neuartigen Stoff. Die Zahl an wissenschaftlichen Publikationen explodiert geradezu. Während im Jahr 2005 nur gut 30 Fachauf-

sätze über Graphen erscheinen, sind es fünf Jahre später schon fast 3000. Mit der Vergabe des Nobelpreises an Geim und Novoselov bricht das Goldfieber dann erst recht aus. Innerhalb von drei Jahren schwillt die Masse an wissenschaftlichen Publikationen zu Graphen auf das Dreifache an. In dieser Phase wittert auch die Industrie ein großes Geschäft: Start-ups werden gegründet, weltweit Patente angemeldet. Zwischen 2010 und 2013 steigt deren Zahl von rund 1000 auf mehr als 7000 pro Jahr an.

Die EU startet ein Forschungsflaggschiff

Am 30. Januar 2013 tritt dann Neelie Kroes vor die Presse. Die damalige Vizepräsidentin der Europäischen Kommission und Kommissarin für die Digitale Agenda verkündet ein Novum: Die EU will im Lauf von zehn Jahren eine halbe Milliarde Euro für die Graphenforschung in Europa spendieren, ebenso viel Geld soll von Förderinitiativen der Mitgliedsstaaten kommen.

Nie zuvor hat die Europäische Union so viel Geld auf einmal für ein Wissenschaftsthema ausgegeben. Das Graphen-Großprojekt soll »Future and Emerging Technology Flagship« heißen. Mehr als 150 Forschungsteams aus 23 Ländern sollen bis 2023 davon profitieren. Zusammen mit Unternehmen sollen sie sich darauf konzentrieren, Graphen vom Labor in die Gesellschaft zu bringen – so das erklärte Ziel des Flaggschiffs. Der Stoff werde vermutlich das in Computerchips übliche Silizium in vielen Anwendungen ersetzen, schwärmt Kroes bei der Bekanntgabe. Das Flaggschiffprojekt könne gar ein »Graphene Valley« in Europa schaffen und das Silicon Valley in Kalifornien ablösen.

Die Argumentation klingt aus damaliger Perspektive schlüssig: In einem elektrischen Schaltkreis lassen sich Transistoren ein- und ausschalten, indem man kontrolliert, wie viel Strom man durch sie hindurchschickt. Das ist das Grundprinzip der digitalen Technik: »Strom ein« steht in der Computersprache für »1« und »Strom aus« für »0«. Derzeit bestehen Transistoren aus hochreinem Silizium. Doch bald könnte Graphen dem Material den Rang ablaufen, hoffen die Köpfe hinter dem EU-Großprojekt: Die Elektronen des Kohlenstoffs wären 100- bis 200-mal beweglicher, daraus gefertigte Schaltkreise könnten Befehle viel schneller ausführen. Feldeffekttransistoren – der mit Abstand populärste Transistortyp – ließen sich deutlich schneller schalten, Prozessoren mit höheren Taktraten wären denkbar.

Das Wundermaterial käme damit genau zur richtigen Zeit, argumentieren Befürworter des Flaggschiffs vor dessen Start. Schließlich soll die Siliziumtechnologie bald eine unüberwindbare Schwelle erreichen, sowohl was die Miniaturisierung angeht als auch in Sachen Taktfrequenz. Von 2021 an könnte Graphen dem graublauen Halbmetall daher den Rang ablaufen, prognostiziert ein Team um Novoselov 2012 in einem Fachartikel.

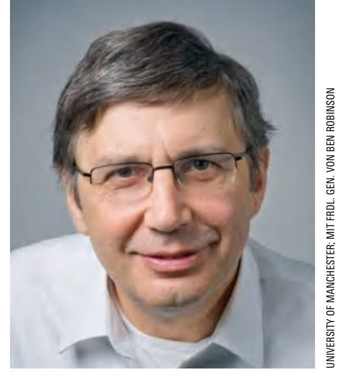
Damit die Materialrevolution Wirklichkeit werden kann, müssen die Forscher jedoch ein grundlegendes Problem lösen. Anders als Silizium weist reines Graphen praktisch keine »Bandlücke« auf. Das bedeutet: Elektronen können sich sehr leicht von ihren Atomkernen lösen – zu leicht. Einmal in Bewegung gesetzt, lässt sich ein Strom schwer wieder stoppen.

Eine Bandlücke ist aber entscheidend für den Einsatz in elektronischen Komponenten. In Silizium fließt Strom nur dann, wenn eine von außen angelegte Spannung den Ladungsträgern über die Barriere hilft. Man könnte auch sagen: Dank der Bandlücke lässt sich ein Transistor von »0« auf »1« schalten.

Lösungen sind denkbar, sagen Graphenbefürworter in jener Zeit. Man könnte beispielsweise einzelne Fremdatome in die hauchdünnen Schichten einfügen oder Graphen in



Mit Graphen überzogenes Plastik könnte einmal herkömmliche Smartphone-Bildschirme ablösen, hoffen Forscher. Das hauchdünne Material schützt empfindliche Silber-Nanodrähte an der Oberfläche.




UNIVERSITY OF MANCHESTER; MIT FRDL. GEN. VON BEN ROBINSON

Andre Geim (links) und Konstantin Novoselov trennten als Erste hauchdünnes Graphen von einem Graphitblock ab. 2010 erhielten sie dafür den Physik-Nobelpreis – der Startpunkt für einen beispiellosen Boom.

dünne Bänder zerschneiden. Das würde dem besonderen Kohlenstoff eine Bandlücke verleihen, und aus dem extrem guten Leiter würde ein Halbleiter wie Silizium.

Das Flaggschiff soll auch andere potenzielle Anwendungen ausloten, zum Beispiel in der Fotovoltaik: Die gängigen Solarzellen aus Silizium reagieren ausschließlich auf Lichtteilchen, die genug Energie zum Überwinden der Bandlücke mitbringen. Graphen in Reinform hat dieses Problem nicht, zudem dringt Strahlung eines breiten Spektrums in den Stoff ein. Damit scheint sich das widerstandsfähige und biegsame Material unter anderem als Beschichtung für Smartphone-Bildschirme zu eignen, die nicht nur durchsichtig ist, sondern auch Strom erzeugt.

Zum Start des Graphen-Flaggschiffs im Jahr 2013 stehen solchen Ideen jedoch noch ganz praktische Hürden im Weg. Die Herstellung des Wunderkohlenstoffs ist extrem teuer, insbesondere wenn Forscher einzelne, fehlerfreie Lagen isolieren wollen, wie man sie für viele Anwendungen benötigt. Die Methode von Geim und Novoselov eignet sich nur bedingt für die Massenproduktion. Mit Klebeband kann man Graphen nur sehr langsam isolieren.

Eine einen tausendstel Millimeter große, derart hergestellte Flocke kostet 2013 rund 1000 US-Dollar, weshalb mancher Beobachter Graphen zum teuersten Material des Planeten erklärt. Aussichtsreicher ist da schon die Technik der chemischen Gasphasenabscheidung. Bei ihr wird ein Gemisch aus Methan und Wasserstoff bei Temperaturen von 1000 Grad mit einem reaktiven Substrat in Kontakt gebracht, auf dem sich dann eine dünne Kohlenstoffschicht bildet. Anschließend muss man das damit verbundene Metall jedoch mit Chemikalien ablösen, was die Graphenschichten leicht beschädigen kann.

Viele Schürfer, keine Nuggets

Die Probleme bei der Fertigung schrecken Investoren nicht ab. Nach dem Start des EU-Großprojekts entdecken in Europa und den USA Dutzende Firmen Graphen für sich. Die chinesische Regierung eröffnet ganze Graphen-Industrieparks. Der größte befindet sich in Changzhou auf einer Fläche von sechs Quadratkilometern. Er beherbergt ein mit 260 Millionen Euro ausgestattetes Forschungsinstitut sowie mehr als 70 Firmen, die Graphen herstellen und damit neue Technologien entwickeln wollen.

Damit gibt es nun auf einmal genug Graphen für ausgiebige Tests. Was noch fehlt, ist ein Produkt für den Massenmarkt, das diesen Aufwand rechtfertigt. Forschergruppen in aller Welt suchen danach und versuchen, das Material besser zu verstehen. »Graphen boomt, aber es fehlt eine Killer-Anwendung«, schreibt das Wissenschaftsmagazin »Nature« im Jahr 2015.

Das gilt aus Sicht vieler Materialwissenschaftler noch immer. Die erste Hälfte des auf zehn Jahre angesetzten Graphen-Flaggschiffs verlief anders, als viele erwarteten: Ein halbes Jahrzehnt nach Kroes' Rede hat geradezu ein Sinneswandel eingesetzt. Viele Experten sind inzwischen der Meinung, dass es das eine große Goldnugget, also eine dominante Graphenanwendung für den Massenmarkt, vielleicht gar nicht gibt.

Als Transistor der nächsten Computergeneration eignet sich Graphen jedenfalls nach wie vor nicht wirklich. Zwar haben Wissenschaftler immer wieder Prototypen für Feldeffekttransistoren aus Graphen entwickelt. Aber bisher ist es nicht gelungen, dem Material eine nennenswerte Bandlücke zu verleihen und dabei die phänomenalen Leitungseigenschaften beizubehalten.

In Labortests haben Forscher immerhin Fortschritte gemacht. 2015 dampfte ein Team um Ed Conrad vom Georgia Institute of Technology zwei Schichten Graphen auf Siliziumkarbid auf, wodurch die Elektronen besondere Bindungen mit dem Untergrund eingingen. Die Leitungselektronen der C-Atome flossen daraufhin nur noch, wenn sie einer Spannung von 0,5 Volt ausgesetzt waren. Damit hatten die Forscher eine knapp halb so große Barriere wie bei Silizium erzeugt – allerdings gerade dadurch, dass sie den Stoff zu Hilfe nahmen, den sie ersetzen wollen. Außerdem sinkt die Leitfähigkeit von Graphen deutlich, wenn man es mit Silizium kombiniert.

Auch ein anderer Ansatz, in den bereits viel Arbeit geflossen ist, hat noch nicht den großen Durchbruch



EU / ETIENNE ANSOTTE; MIT FRDL. GEN. VON GRAPHENE FLAGSHIP

2013 verkündete EU-Kommissarin Neelie Kroes (rechts) den Start des eine Milliarde Euro schweren »Graphen-Flaggschiffs«. Unter der Leitung von Jari Kinaret (links) soll das Großprojekt Anwendungen für den Wunderstoff auftun.

gebracht: Zerschneidet man eine Graphenschicht in wenige Nanometer breite Bänder, weisen diese eine für die Digitaltechnik geeignete Bandlücke auf. Im Gegensatz zu aktuellen Halbleitern sind solche Nanobänder allerdings viel schwieriger herzustellen. Denn eine Schwankung in der Breite von einem Atomdurchmesser kann bereits einen erheblichen Einfluss auf die Bandlücke haben. Die Erfolgsaussichten dieses Ansatzes seien nach wie vor unklar, fassten Forscher um Frank Schwierz von der Technischen Universität Ilmenau die Lage im Juli 2017 zusammen. Eine der Herausforderungen liegt darin, viele der Bänder auf einem Chip zu platzieren. Dazu fräst man beispielsweise mit Elektronenstrahlen Bahnen in eine Siliziumkarbid-Fläche und bringt anschließend Graphen in den Lücken auf. Mit diesem Verfahren haben Forscher bereits 10000 Graphen-Nanobänder auf einen 24 Quadratmillimeter großen Siliziumkarbid-Chip gepackt.

Zu einem Produkt, das es mit handelsüblichen Computerbauteilen aufnehmen kann, ist der Weg jedoch noch sehr weit: In handelsüblichen Mikroprozessoren kommen auf jeden Quadratmillimeter rund zehn Millionen Siliziumtransistoren. Die Vision einer Elektronikrevolution durch Graphen ist somit mehr denn je eine Wette mit ungewissem Ausgang, vielleicht auch eine Sackgasse. Einige Forscher haben den Glauben an die große Markteinführung des Stoffs jedenfalls verloren: »Ich denke nicht, dass die Halbleiter- oder die Solarzellenindustrie auf diesen Zug aufspringen werden«, sagt der Materialwissenschaftler Christian Klinke von der Universität Hamburg. »Die versuchen einige Sachen hier und da, aber das sind eigentlich stets Nischenanwendungen.«

Generell ist den Goldgräbern bisher wenig Wertvolles in die Hände geraten. Zu den Produkten, die den Sprung aus dem Labor geschafft haben, zählen spezielle LED-Glühbirnen, deren Leuchtfäden mit Graphen beschichtet sind und effizienter sowie haltbarer sein sollen. Dazu gesellen sich erste Modelle von graphenhaltigen Tennisschlägern, Motorradhelmen und Rennrädern, deren Besitzer davon profitieren, dass Graphen leicht und zugleich robust ist.

In China findet man den Kohlenstoff vereinzelt auch in den Akkus, Displays und Gehäusen von Handys. Bei diesen Anwendungen kommen jedoch längst nicht immer einzelne Kohlenstofflagen zum Einsatz, sondern oft Komplexe aus Nanopartikeln. Sie bestehen aus vielen übereinandergehäuften, verknitterten Graphenschichten. In dieser Form lässt sich das Material deutlich einfacher gewinnen.

In Sachen mechanischer Stabilität prägt derweil eine andere Form von Kohlenstoff seit Langem den Markt: Gehärtete Kohlenstofffasern, die eine ähnliche Struktur wie Graphit aufweisen, verstärken mit ihrer Zugfestigkeit seit Jahren Flugzeugbauteile. Zuweilen werden auch Brücken mit ihnen stabiler gemacht. Mit Graphen im eigentlichen Sinn – das per Definition eine einzelne oder einige wenige isolierte Schichten eines Graphitblocks darstellt – haben diese Anwendungen aber nichts zu tun.

Wenn es um die Vermarktung des vermeintlichen Wundermaterials geht, haben Unternehmer teils kuriose Einfälle: So schlugen einige Wissenschaftler unlängst ein »Graphen-Kondom« vor, das besonders stabil und flexibel sein soll. Wie viele andere Graphen-Anwendungen wirkt das nicht gerade wie eine Materialrevolution.

Auf anderen Anwendungsfeldern gibt es immerhin viel versprechende Laborstudien: In Experimenten bewies Graphen beispielsweise, dass es Terahertz-Wellen übertragen und empfangen kann – und das in rekordverdächtiger Geschwindigkeit. So stellten Forscher um Xinxin Yang von der Chalmers University of Technology in Göteborg 2017 einen flexiblen, auf einer Plastikfolie platzierten Detektor für die langwellige Infrarotstrahlung vor.

Mit der Zeit wurde deutlich, dass die Forscher eine wichtige Eigenschaft von Graphen unterschätzt haben: Das Material weist eine beeindruckende Wärmeleitfähigkeit auf. Das könnte nützlich sein, um Computerchips und Batterieelektroden vor Überhitzung zu schützen. Der chinesische Kommunikationsausrüster Huawei etwa stellte 2016 eine Batterie vor, deren Elektroden Graphen enthalten. Damit ließ sich die Betriebstemperatur des Akkus um fünf Grad Celsius senken. Im Oktober 2018 präsentierte die Firma außerdem ein neues Smartphone, das Graphen als Kühlmaterial für die Batterie verwendet.

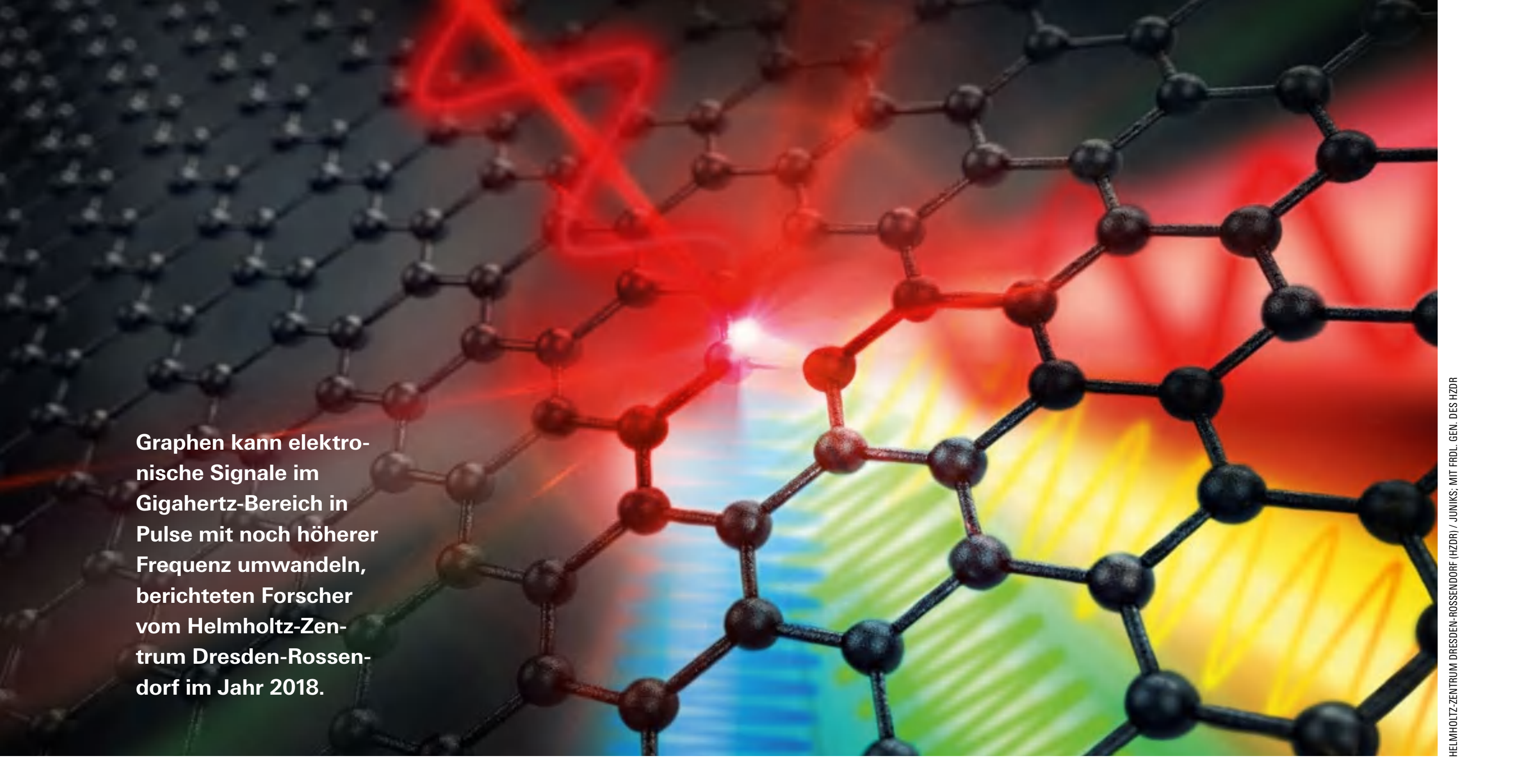
Aber auch diese Einsatzzwecke wirken noch wie Nischenanwendungen, die weit entfernt sind von den großen Hoffnungen von einst. Insgesamt scheint das Forschungsinteresse an Graphen momentan etwas abzuflauen. 2017 schrieben Wissenschaftler erstmals, seit Geim und Novoselov das Material isolierten, weniger Fachaufsätze zu der populären Kohlenstoffvariante als im Vorjahr. Mit mehr als 13000 Veröffentlichungen erschienen trotzdem jeden Tag noch ungefähr 36 neue Artikel. In der Patentlandschaft deutet sich ein ähnlicher Trend an: Experten schätzen, dass 2016 und 2017 erstmals nicht länger mehr Patente angemeldet wurden als in den Vorjahren.

Brauchen die Goldgräber bloß einen längeren Atem?

Hat die Europäische Kommission also zu viel Geld in einen halbgaren Traum investiert? Oder braucht man nur mehr Geduld? Wer sich unter beteiligten Wissenschaftlern umhört, kriegt mal die eine, mal die andere Einschätzung zu hören. »Ein wissenschaftliches Projekt, bei dessen Start klar ist, dass es alle Ziele erreichen wird, ist wenig innovativ«, sagt etwa der Nanophysiker Carsten Busse von der Universität Siegen. »Wenn man in zehn Jahren alles geschafft hat, dann hat man sich zu wenig vorgenommen.«

Der am Flaggschiff beteiligte Materialwissenschaftler Vladimir Falko von der University of Manchester verteidigt das Projekt ebenfalls: Zum Start habe man Graphen in erster Linie als elektronisches Material gesehen, bestätigt er. Aber mittlerweile habe man erkannt, sagt Falko, dass es in vielen anderen Gebieten Anwendung finden könnte. »Nun erforscht man mit dem Segen der EU-Kommission eine große Bandbreite an Einsatzzwecken.«

Eine Graphenforscherin, die namentlich nicht genannt werden will, sieht das EU-Großprojekt hingegen deutlich kritischer. Sie spricht von einem unberechtigten Hype, den Graphen entfacht habe. Ihrer Meinung nach wurden Forscher zu früh angespornt, Anwendungen für das Material zu finden. Dabei sei die Wissenschaft dafür noch gar nicht



Graphen kann elektronische Signale im Gigahertz-Bereich in Pulse mit noch höherer Frequenz umwandeln, berichteten Forscher vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf im Jahr 2018.

HELMHOLTZ-ZENTRUM DRESDEN-ROSSENDORF (HZDR) / JUNIKS; MIT FRDL. GEN. DES HZDR

bereit gewesen. Für das EU-Flaggschiff hätten sie und andere sich einen anderen Fokus gewünscht: Statt sich auf ein bestimmtes Material zu konzentrieren, hätte man ein spezifisches Problem auswählen können, das man lösen will, zum Beispiel, kleinere Computerchips zu bauen. So hätte man die Halbleiterindustrie wahrscheinlich schneller revolutioniert, argumentiert die Materialwissenschaftlerin.

Sie ist bei Weitem nicht die einzige Kritikerin. Er sehe in Graphen nicht viel mehr als die neue Kohlenstoffnanoröhre, sagte Ross Kozarsky vom US-amerikanischen Marktforschungsunternehmen Lux Research 2015 im Gespräch mit »Nature«. Die aufgerollte Kohlenstoffvariante wurde in den 1990er Jahren mit ähnlich großen Vorschusslorbeeren bedacht wie Graphen. Bis heute sind aber allenfalls Spezialfälle aufgetaucht, in denen sie nützlich sind. Ob es mit Graphen genauso kommt?

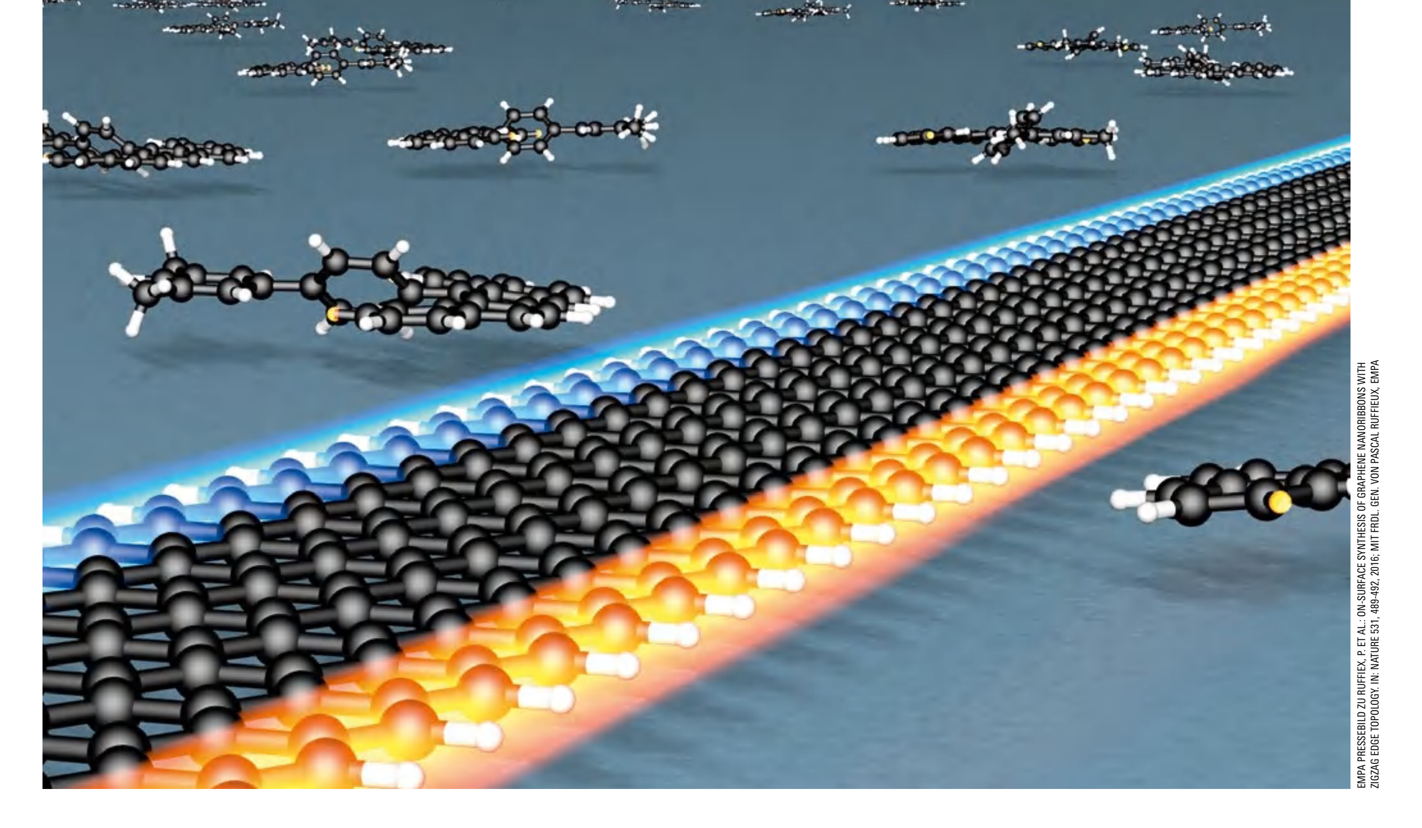
Wie schnell und ob eine wissenschaftliche Entdeckung in ein Produkt verwandelt wird, ist generell sehr unterschiedlich. Manchmal klappt es gar nicht. Und mitunter dauert es sehr lange, wie zum Beispiel bei Solarzellen. Alexandre Edmond Becquerel entdeckte schon im Jahr 1839, dass Licht Ladungsträger aus einer Metalloberfläche herauslösen kann. Die erste Solarzelle konnte man jedoch erst Anfang der 1950er Jahre kaufen. 20 Jahre seien im Durchschnitt ein realistischer Zeitraum zwischen Entdeckung eines Materials und seiner Kommerzialisierung, schrieben dagegen die Graphenforscher Amaia Zurutuza und Claudio Marinelli 2014 in einer Analyse. So lange habe es gedauert, bis der heute weit verbreitete Kunststoff Polyethylen außerhalb spezieller Nischen eingesetzt wurde. Ähnlich sei es bei den Aramide-Polymerfasern gewesen: Erst nach zwei Jahrzehnten wurde das als »Kevlar« bekannte Material in kugelsicheren Westen zu einem kommerziellen Erfolg.

Seit der Veröffentlichung der Entdeckung von Graphen sind nun 15 Jahre vergangen. In dieser Zeit haben Wissenschaftler zweifellos Fortschritte gemacht, wenn auch wohl nicht so große wie erhofft. Immerhin ist es heute günstiger denn je, das Material in größeren Mengen herzustellen. 2010 kostete hochwertiges Graphen, das per Gasphasenabscheidung auf einem Siliziumsubstrat aufgebracht wurde, noch rund 1700 Euro pro Quadratzentimeter. Bis 2013 sank der Preis auf gut 270 Euro. Mittlerweile bekomme man defektfreies Graphen dieser Größe schon für unter einem bis sechs Euro, wenn man entsprechend große Mengen abnimmt, sagt Jesus de la Fuente, der Geschäftsführer einer der führenden Produzenten von Graphen. Damit kostet ein Quadratmeter des Stoffs allerdings immer noch zehntausende Euro.

Vielleicht braucht man auch gar nicht so gewaltige Mengen. Als dezente Beigabe könnte der Stoff durchaus manches Produkt verbessern. Darauf deuten jedenfalls die anhaltenden Entwicklungsbemühungen großer Industrieunternehmen hin. Das Forschungsinstitut der Firma Samsung stellte im November 2017 beispielsweise 20 bis 30 Nanometer große »Graphenbälle« her, mit denen sich sowohl die Anoden als auch die Kathoden von Lithium-Ionen-Batterien beschichten ließen. Die winzigen Kugeln bestehen aus Siliziumdioxid-Nanopartikeln, auf die Graphen aufgedampft wurde, die Forscher sprechen von einem »popcornähnlichen Material«. Damit ausgestattete Lithium-Akkus ließen sich schneller laden und waren noch nach Hunderten von Ladezyklen stabiler als Vergleichsbatterien ohne Graphenbälle, berichten die Forscher. Noch ist allerdings nicht bekannt, wann und ob Samsung die Graphen-Batterien auf den Markt bringen wird.

In Kombination mit anderen Stoffen könnte Graphen doch noch glänzen

Auch in der Mikroelektronik geht der Trend in die Richtung, Graphen zur Verbesserung bereits etablierter Technologien zu verwenden. Statt Silizium abzulösen, soll der Kohlenstoff es also an einigen Stellen sinnvoll ergänzen. »Wenn Graphen allein nicht so gut für spezielle Anwendungen ist, kann man es vielleicht mit anderen klassischen Halbleitermaterialien kombinieren«, sagt Christian Klinke. »So könnte man gewissermaßen das Beste aus beiden Welten erhal-



EMPA PRESSEBILD ZU RUFFIEX, P. ET AL.: ON-SURFACE SYNTHESIS OF GRAPHENE NANORIBBONS WITH ZIGZAG EDGE TOPOLOGY. IN: NATURE 531, 489-492, 2016; MIT FRDL. GEN. VON PASCAL RUFFIEUX, EMPA

2016 züchteten Forscher des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung Graphen-Nanobänder mit Zickzackrand. Diese haben nicht nur eine Bandlücke, sondern stellen auch Datenverarbeitung mit Hilfe des Spins von Elektronen in Aussicht.

ten.« 2017 entwickelte ein Team um Frank Koppens vom Barcelona Institute of Science and Technology etwa einen Sensor auf Basis von Silizium-Schaltkreisen, der mit 110 000 winzigen Graphen-Lichtdetektoren ausgestattet ist. Die Erfindung könnte sich aus Sicht der Forscher für den Einsatz in Digitalkameras eignen und auch Bilder im Infraroten und Ultravioletten aufnehmen.

Für eine andere Studie aus dem Jahr 2017 entwarfen Wissenschaftler um Marco Romagnoli vom Photonic Networks & Technologies National Laboratory in Pisa einen Kondensator aus Graphen und Silizium, mit dem sich Lichtwellen effizienter verändern lassen als mit manchem verfügbaren Siliziummodulator. Solche Bauteile könnten deutlich höhere Bandbreiten bei der Datenübertragung ermöglichen, prognostizieren die Experten.

Die Leitung des Flaggschiffs wähnt sich mit Blick auf diese und andere Ergebnisse jedenfalls auf Kurs: »Wir haben dieses Jahr eindeutig gezeigt, dass das Flaggschiff nach wie vor auf dem Weg ist, seine Versprechen einzulösen«, schrieb Jari Kinaret, der Direktor des Projekts, im Jahresbericht für 2017.

Ob sich Graphen-Technologien gegen bestehende Produkte durchsetzen werden, wird aber nicht nur von wissenschaftlichen Kriterien abhängen. So müsse eine Technologie von der Industrie erst in ein Produkt verwandelt werden, das dann am Ende vom Konsumenten auch angenommen wird, sagt Carsten Busse. »Das sind Spielfelder, auf denen wir als Wissenschaftler überhaupt nicht mehr mitreden können.« Gerade in der Halbleiterindustrie seien die Hürden für eine Markteinführung von Graphen-Produkten beträchtlich, findet er: »Die siliziumbasierte Technologie hat hier einen gigantischen Vorsprung.« Ein neues Material müsse etwas wirklich grundlegend besser machen, um überhaupt eine Chance zu haben. »Zehn Prozent kleiner oder zehn Prozent schneller, das ist in so einem Fall zu wenig.«

Ein Faktor dürfte ebenfalls sein, wie risikobereit Investoren und Firmen sind und ob sie wirklich einen langen Atem haben. Auffällig ist in dieser Hinsicht, dass man in Ostasien eifriger nach durchschlagenden Graphen-Anwendungen sucht als in Europa. Die Zeitung »China Daily« berichtete im November 2017, dass sich in China knapp 3000 Firmen mit Graphen beschäftigen. Auch die meisten Patente kommen aus dem Land. Den weltweit fleißigsten Goldgräber – beziehungsweise Antragsteller für Graphen-Patente – beheimatet derweil Südkorea: Es ist der Elektronikgigant Samsung.

In Europa hingegen dürfe man die Förderung durch das Flaggschiff nicht überschätzen, findet Christian Klinke: »Wir reden hier pro Jahr von 100 Millionen Euro, auf ganz Europa verteilt.« Für den einzelnen Gruppenleiter entspreche das vielleicht ein oder zwei Doktoranden, die er mehr anstellen könne. »Es ist nicht so, als würde hier jemand mit extremen Summen überhäuft.«

Dabei ist derzeit noch offen, ob der gesamte in Aussicht gestellte symbolträchtige Betrag von einer Milliarde Euro wirklich abgerufen wird. Das Graphen-Flaggschiff sieht eigentlich vor, dass die EU-Staaten selbst vermehrt Forschungsprojekte rund um das Wundermaterial fördern und so die Hälfte des Geldes beisteuern.

Ob sie dies bis 2023 im erwarteten Umfang tun, ist momentan noch unklar. Bisher hat sich vor allem die Regierung Großbritanniens hervorgetan und mehr als 140 Millionen Euro in die Graphenförderung investiert. Knapp die Hälfte des Geldes floss jedoch nicht direkt in Wissenschaftsprojekte, sondern in die Behausung des National Graphene Institute in Manchester. Und die Europäische Kommission? Sie hat bislang weniger Mittel in die Graphen-

forschung gesteckt als angekündigt. Laut Finanzierungsplan fließt bis Ende 2020 weniger als die Hälfte der halben Milliarde Euro, die Neelie Kroes angekündigt hatte, in das Graphen-Flaggschiff. Die Leitung habe deshalb beantragt, das Projekt über das ursprünglich anvisierte Ende im Jahr 2023 hinaus zu verlängern, so Flaggschiff-Direktor Kinaret auf Nachfrage. Entschieden sei allerdings noch nichts.

Das wahre Gold

Selbst wenn in den nächsten Jahren kein Graphen-Produkt für den Massenmarkt auftaucht: Die Erforschung des Materials könnte immerhin die Wissenschaft voranbringen, wenn auch nicht zwangsläufig in kommerzieller Hinsicht. So scheint Graphen der Prototyp einer ganz neuen Klasse von Festkörpern zu sein – und könnte doch noch wichtige Impulse für die Materialwissenschaft liefern.

Denn seit es Geim und Novoselov gelungen ist, Graphen herzustellen, haben Forscher auch bei anderen geschichteten Materialien genauer hingeschaut. Oft lassen sich bei diesen ebenfalls einzelne Lagen isolieren. Damit ändern sich die elektronischen Eigenschaften häufig genauso drastisch, wie das beim Übergang von Graphit zu Graphen der Fall ist.

Solche zweidimensionalen (2-D-)Materialien sind in den vergangenen Jahren zu einem der spannendsten Teilgebiete der Physik avanciert. Da ist zum Beispiel hexagonales Bornitrid, dessen Lagen dem Maschendrahtzaun von Graphen sehr ähnlich sind. Die einzelnen Schichten haben isolierende Eigenschaften, leiten also wegen ihrer besonders großen Bandlücke keinen Strom. Sie könnten als Isolierstoff in der Mikroelektronik Anwendung finden.

Wissenschaftler schenken außerdem ultradünnen Halbleitern mehr Aufmerksamkeit, so genannten Übergangsmetalldichalkogeniden, etwa Molybdändisulfid (MoS_2) und Wolframdiselenid (WSe_2). Als Transistor eignen sie sich viel besser als Graphen. Auch in einer Solarzelle sind sie denkbar, denn sie nehmen bei Sonneneinstrahlung mehr als zehn Prozent der eintreffenden Lichtteilchen auf, bei Graphen sind es nur zwei. Der Effekt ist sogar umkehrbar: Bei angelegter Spannung können die Ladungsträger ihre Energie in Form von Photonen abgeben, was sich in winzigen LEDs oder Lasern nutzen ließe.

2015 gelang es Forschern sogar, einen Transistor aus der zweidimensionalen Variante von Silizium herzustellen, so genanntem Silicen. Das Material reagiert jedoch bereitwillig mit der Umgebungsluft und muss daher aufwändig isoliert werden – ein Problem, das einige der 2-D-Stoffe haben. Für großes Aufsehen sorgte auch eine Entdeckung aus dem Jahr 2018, welche »Nature« sogar zu den zehn wichtigsten Wissenschaftserfolgen des Jahres zählt: Im März verwandelte Yuan Cao vom Massachusetts Institute of Technology Graphen in einen Supraleiter. Dazu verdrehte der Doktorand zwei übereinandergelagerte Graphenschichten um 1,1 Grad gegeneinander und kühlte sie auf minus 271,5 Grad Celsius ab. Das Material leitete daraufhin Strom gänzlich ohne elektrischen Widerstand.

Von seinen Leitungseigenschaften her erinnert supraleitendes Graphen an so genannte Cuprate, also kupferhaltige Verbindungen, die bei viel höheren Temperaturen supraleitend werden. Vielleicht, hoffen Materialwissenschaftler, wird man mit dem einfacher zu handhabenden Kohlenstoff die physikalischen Mechanismen hinter dieser Hochtemperatur-Supraleitung besser verstehen lernen.

Letztlich haben Wissenschaftler durch die Graphenforschung nicht nur neue Materialien entdeckt, sondern völlig neue Phänomene, die in so genannten topologischen Isolatoren auftreten (siehe **Spektrum** Februar 2019, S. 50). Diese weisen eine große Bandlücke auf und leiten daher elektrischen Strom eigentlich nicht. Doch an ihrer Oberfläche können sich Ladungsträger frei bewegen, was langfristig bei der Entwicklung futuristischer Quantencomputer helfen könnte.



ISTOCK / 3ALEXD

In den vergangenen Jahren haben Materialwissenschaftler auch das Dreidimensionale wiederentdeckt. Sie experimentieren heute damit, verschiedene 2-D-Materialien aufeinanderzuschichten. So lassen sich die jeweiligen Besonderheiten der einzelnen Lagen räumlich nutzen. Beispielsweise haben Forscher schon erste Solarzellen aus übereinandergeschichtetem MoS_2 und Graphen hergestellt: Ersteres absorbiert die Photonen effizient, während Graphen die erzeugten Elektronen schnell weiterleitet.

»Nur weil Graphen jetzt vielleicht etwas weniger stark leuchtet als früher, heißt es nicht, dass es nicht ein guter Forschungsansatz war«, sagt Christian Klinke. »Eventuell stoßen wir irgendwann plötzlich auf ein anderes Wundermaterial, das die Ansprüche erfüllt.«

Im europäischen Flaggschiff hat man sich den Entwicklungen jedenfalls angepasst. Graphen ist längst nicht mehr der alleinige Fokus des Großprojekts. Ungefähr zwei Drittel der insgesamt 15 Teilprojekte geben nun an, dass sie auch mit anderen 2-D-Materialien arbeiten. Vielleicht entpuppen diese sich ja als das wahre Gold der Materialwissenschaft. ◂

QUELLEN

Cao, Y. et al.: Unconventional Superconductivity in Magic-Angle Graphene Superlattices. In: Nature 556, S. 43–55, 2018

Conrad, E.H. et al.: Semiconducting Graphene from Highly Ordered Substrate Interaction. In: Physical Review Letters 115, 136802, 2015

Geng, Z. et al.: Graphene Nanoribbons for Electronic Devices. In: Annalen der Physik 529, 1700033, 2017

Son, I.H. et al.: Graphene Balls for Lithium Rechargeable Batteries with Fast Charging and High Volumetric Energy Densities. In: Nature Communications 8, S. 1–11, 2017

Novoselov, K. et al.: A Roadmap for Graphene. In: Nature 490, S. 192–200, 2012

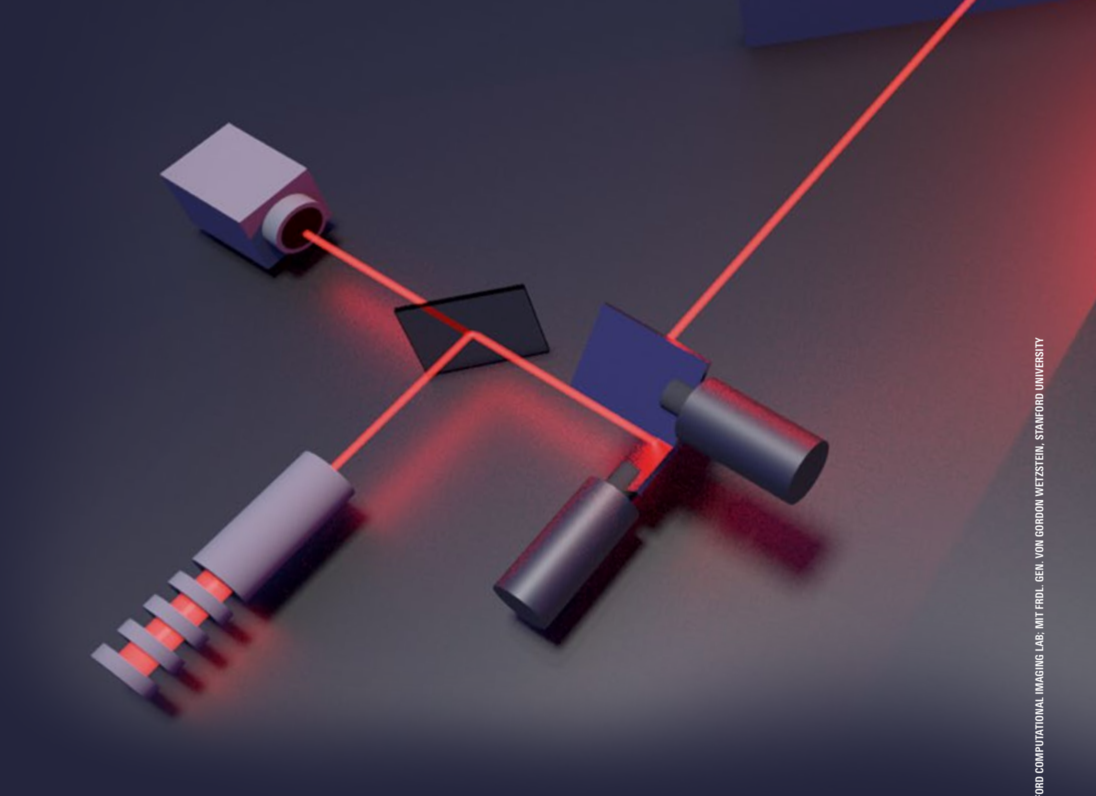
BILDGEBUNG UM DIE ECKE GEBLICKT

Unsere Umgebung enthält verborgene visuelle Informationen, die sich Schritt für Schritt enthüllen lassen. Dadurch können sie Objekte fotografieren, die Forscher hinter einer Ecke verstecken oder einen Raum mittels einer Chipstüte abhören.



Nathalie Wolchover ist Physikerin und Wissenschaftsjournalistin in New York. Sie schreibt regelmäßig für das »Quanta Magazine«.

▸▸ spektrum.de/artikel/1621170



STANFORD COMPUTATIONAL IMAGING LAB; MIT FRDL. GEN. VON GORDON WETZSTEIN, STANFORD UNIVERSITY

Als der Informatiker Antonio Torralba 2012 an der Küste seines Heimatlands Urlaub machte, fiel ihm etwas Seltsames auf: An einer Wand des Hotelzimmers zeichneten sich kaum wahrnehmbare Schatten ab, die aus dem Nichts zu stammen schienen. Nach näherem Hinsehen erkannte er, dass es sich gar nicht um einen Schattenwurf handelte. In Wirklichkeit betrachtete Torralba das umgedrehte Abbild der Terrasse vor seinem Fenster. Offenbar funktionierte Letzteres wie eine Lochkamera – die rudimentärste Form einer Kamera, bei der Lichtstrahlen eines Objekts durch eine kleine Öffnung hindurchdringen und dahinter ein umgekehrtes Bild davon ergeben. Dem Informatiker wurde in diesem Moment bewusst, dass unsere Welt voll visueller Informationen ist, die unsere Augen nicht wahrnehmen. »Diese Bilder sind uns verborgen«, erklärt er, »aber sie sind überall um uns herum, die ganze Zeit.«

Sobald Torralba aus seinem Urlaub ans Massachusetts Institute of Technology (MIT) zurückgekehrt war, sprach er mit seinem Kollegen William Freeman über seine seltsame Beobachtung. Plötzlich fielen den beiden Wissenschaftlern all die »unabsichtlichen Kameras« auf, die uns schon immer umgeben: Fenster, Ecken, Zimmerpflanzen und andere gewöhnliche Objekte erzeugen ständig subtile Bilder, die mit dem bloßen Auge meist nicht zu erkennen sind (siehe Bilder S. 61). »Wir haben überlegt, wie wir diese Bilder herausfiltern und sichtbar machen können«, sagt Freeman.

In den kommenden Jahren sollte er zusammen mit Torralba enthüllen, wie viel visuelle Information tatsächlich in unserem Sichtfeld steckt. In einer ersten Arbeit kurz nach Torralbas Urlaub nahmen die beiden Forscher die wechselnden Lichtverhältnisse an einer Zimmerwand mit einer einfachen Smartphone-Kamera auf und rekonstruierten daraus ein Bild der Terrasse vor dem Fenster. Fünf Jahre später filmten sie zusammen mit ihren Mitarbeitern den schattigen Boden vor einer Straßenecke und konnten anhand der Daten erkennen, ob sich eine Person hinter der Ecke befand. Und im Sommer 2018 nahmen sie ein dreidimensionales Bild eines Raums auf, indem sie bloß den Schattenwurf der Blätter einer darin befindlichen Pflanze untersuchten.

Die unabsichtlichen Kameras erzeugen aber nicht nur Bilder, sondern dienen auch als »visuelle Mikrofone«: Indem Torralba und Freeman minimale Schwingungen auf Objekten wie Zimmerpflanzen analysierten, konnten sie von außen gesprochene Sätze im betreffenden Raum abhören, selbst wenn dieser schalldicht war.



Wissenschaftler strahlen einen Laserstrahl auf die Wand, um die Form der Hasenfigur hinter dem Bildschirm zu rekonstrieren. Rechts ist das Ergebnis gezeigt.

STANFORD COMPUTATIONAL IMAGING LAB; MIT FRDL. GEN. VON GORDON WETZSTEIN, STANFORD UNIVERSITY

STANFORD COMPUTATIONAL IMAGING LAB; MIT FRDL. GEN. VON GORDON WETZSTEIN, STANFORD UNIVERSITY

Torralba und Freeman begründeten mit ihren ersten Arbeiten innerhalb kürzester Zeit ein rapide wachsendes Forschungsgebiet, in dem Wissenschaftler versuchen, möglichst viel verborgene visuelle Information aus unserer Umgebung zu extrahieren. Neben den zwei Informatikern spielte hier auch eine andere Arbeitsgruppe vom MIT unter der Leitung von Ramesh Raskar eine große Rolle. Schnell wurde das US-amerikanische Verteidigungsministerium auf die sich eröffnenden technischen Möglichkeiten aufmerksam und startete 2016 das 27 Millionen US-Dollar teure REVEAL-Programm (Revolutionary Enhancement of Visibility by Exploiting Active Light-fields), das eine Reihe neuer Laboratorien in den USA finanziert. Seitdem nutzt das junge Forschungsfeld mehr und mehr neue Erkenntnisse aus den verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen. Damit werden die ausgeklügelten Methoden leistungsfähiger, und technische Umsetzungen rücken immer näher.

Neben den offensichtlichen militärischen Anwendungen, insbesondere zur Spionage, könnten die neuen Technologien aber auch andere Gebiete bereichern, etwa selbstfahrende Autos, Robotik, medizinische Bildgebung, Astronomie und Weltraumforschung sowie Such- und Rettungseinsätze effektiver gestalten.

Torralba sagt, dass er und Freeman kein besonderes Einsatzgebiet im Sinn hatten, als sie mit ihrer Forschung begannen. Eigentlich wollten sie nur begreifen, wie Bilder entstehen und was genau eine Kamera ausmacht. Im Zuge dieser Fragen untersuchten sie, wie Licht mit Objekten und Oberflächen wechselwirkt. Und plötzlich stießen die beiden Informatiker auf Dinge, nach denen bisher noch niemand gesucht hatte.

Psychologische Studien haben gezeigt, so Torralba, »dass Menschen wirklich furchtbar schlecht darin sind, Schatten zu interpretieren. Das könnte daran liegen, dass viele dieser Muster in Wirklichkeit gar keine Schatten sind. Irgendwann gab es das Auge dann wohl auf, überhaupt zu versuchen, sie zu verstehen.«

Ständig treffen Lichtstrahlen von der Welt außerhalb unseres Blickfelds auf Wände und andere Oberflächen in unserer Nähe, um dort geradewegs in unsere Augen reflektiert zu werden. Im Prinzip wären wir also in der Lage, viel mehr Informationen zu verarbeiten, doch die visuellen Überreste sind so schwach ausgeprägt, dass wir sie nicht wahrnehmen. Es gibt einfach zu viele dieser Lichtstrahlen, die sich in unzählige Richtungen bewegen und sich gegenseitig überlagern.

Damit ein klares Bild entsteht, muss man die relevanten Lichtstrahlen stark einschränken. Das ist das Prinzip einer Lochkamera, deren Öffnung so klein ist, dass nur ein winziger Teil des Lichts eindringt. Je kleiner die Blende ist, umso schärfer wird das Bild. Im Idealfall lässt sie zu jedem Punkt des abzubildenden Objekts nur einen einzigen Lichtstrahl mit dem richtigen Winkel durch.

Bilder unabsichtlicher Kameras bahnen sich einen Weg in unser Sichtfeld

Das Fenster in Torralbas Hotelzimmer war zu groß, um die davor befindliche Terrasse deutlich abzubilden. Zusammen mit Freeman erkannte er aber, dass ein Computer die verschwommenen Schattierungen entziffern kann. Als die beiden Informatiker weiter über dieses Phänomen nachdachten, wurde ihnen klar, dass nicht nur Fenster unabsichtliche Kameras darstellen. Tatsächlich umgeben uns lauter Objekte, die Lichtstrahlen einschränken und auf diese Weise vage Bilder erzeugen. Während es ziemlich selten vorkommt, dass man wie in Torralbas Fall auf eine unabsichtliche Lochkamera stößt, trifft man hingegen häufig das Gegenteil davon an: So genannte Antilochkameras, die aus einem kleinen Licht blockierenden Objekt bestehen.

Um zu verstehen, wie eine Antilochkamera funktioniert, hilft folgendes Beispiel: Stellen Sie sich vor, Sie filmen die Innenwand eines Raums durch einen dünnen Spalt im Rollladen. Von dem Video könnte man vermutlich nicht sehr viel über das Zimmer lernen. Plötzlich taucht der Arm einer Person im Blickfeld auf. Indem man die Lichtintensität an der Wand vor und nach dem Erscheinen des Arms miteinander vergleicht, erfährt man etwas über den Raum. Ein Satz Lichtstrahlen, der anfangs ungehindert auf die Wand trifft, wird im nächsten Augenblick kurzzeitig durch den Arm blockiert. Man muss nur noch die Daten des zweiten Bilds von denen des ersten abziehen, erklärt Freeman, »um herauszufinden, welche Lichtstrahlen genau der Arm aufgehalten hat«. Sie enthalten nämlich Informationen über einen Teil des verborgenen Raums. Nun können die Forscher die gesammelten Daten digital verarbeiten und daraus einen Ausschnitt des Zimmers abbilden. »Indem wir nicht bloß Objekte betrachten, die Licht durchlassen«, ergänzt er, »sondern auch solche, die es aufhalten, erweitern wir unsere technischen Möglichkeiten.«

Als Torralba und Freeman die winzigen Intensitätsunterschiede in ihrer Umgebung untersuchten, kam ihnen die Idee, dass auch feinste Farbveränderungen und kleinste Bewegungen interessant sein könnten. Zusammen mit ihren Kollegen entwarfen sie Algorithmen, durch die man zum Beispiel erkennt, wie Blut bei jedem Herzschlag in das Gesicht eines Menschen hinein- und wieder herausströmt.

»Mary had a little lamb …«, hört man eine männliche Stimme sagen – die ersten Worte, die Thomas Edison 1877

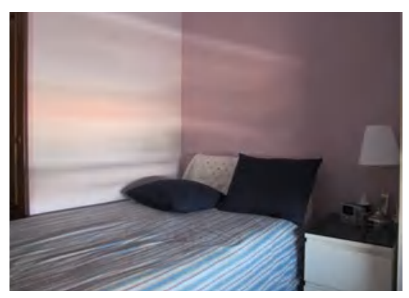
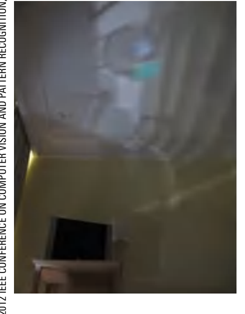
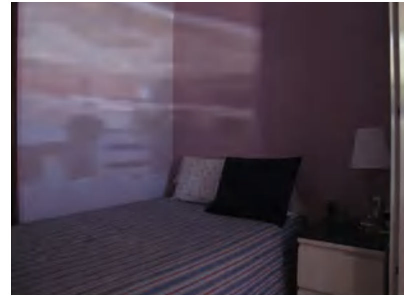
AUF EINEN BLICK
LAUTER UNABSICHTLICHE KAMERAS

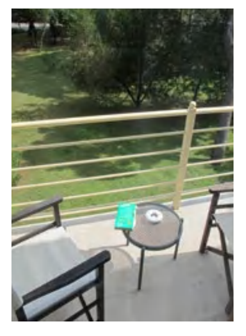
1 Unsere Umgebung steckt voll visueller Information, die von der Welt außerhalb unseres Sichtfelds stammt. Selbst einfache Handykameras können vage Schatten registrieren und so versteckte Bilder enthüllen.

2 Die effektiven Algorithmen der Wissenschaftler machen es sogar möglich, ein dreidimensionales Bild eines Raums aus dem Schattenwurf der Blätter einer Zimmerpflanze zu gewinnen.

3 Ein alternativer Ansatz bedient sich eines Lasersystems, um verborgene Objekte offen zu legen – oder auch in einem geschlossenen Buch zu lesen.

TORRALBA, A., FREEMAN, W.T.: ACCIDENTAL PINHOLE AND PINSPECK CAMERAS: REVEALING THE SCENE OUTSIDE THE PICTURE. IN: 2012 IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, S. 374-381, 2012, FIG. 2; MIT FRDL. GEN. VON ANTONIO TORRALBA, MIT


Die seltsamen Schattierungen in den Räumen (oben) können durch eine digitale Verarbeitung verstärkt werden (zweite Reihe). Die so entstandenen Bilder spiegeln die Szene vor dem Fenster des jeweiligen Raums wider (unten) – allerdings auf dem Kopf stehend, so dass man sie umdrehen muss (dritte Reihe).

mit einem Phonographen aufnahm. 2014 rekonstruierten Torralba und Freeman diese Aufnahme, als sie eine Chipstüte durch ein schalldichtes Fenster filmten. Aus den Bewegungen, welche die Schallwellen bei der dünnen Plastikoberfläche verursachten, erzeugten die beiden Wissenschaftler wieder ein verständliches akustisches Signal. Normalerweise gehen so schwach ausgeprägte visuelle Signale einfach im allgemeinen Rauschen einer Aufnahme unter. Doch die Wissenschaftler bedienten sich eines mathematischen Kniffs: Sie wandelten die zweidimensionalen Wellen auf der Chipstüte in eindimensionale Überlagerungen von Sinusfunktionen um, indem sie über die Bewegungen mehrerer Bereiche der Tüte mittelten. Durch diesen Trick rechnet sich das Rauschen heraus und dominiert nicht mehr das gesamte Signal. Um die minimalen Hebungen und Senkungen genau zu berechnen, verglichen die Forscher die Sinusfunktionen zweier Bilder der aufgenommenen Videosequenz und verstärkten ihre Unterschiede. Aus diesen Daten extrahierten die Forscher dann die akustischen Informationen und rekonstruierten so Töne, Melodien und sogar Reden.

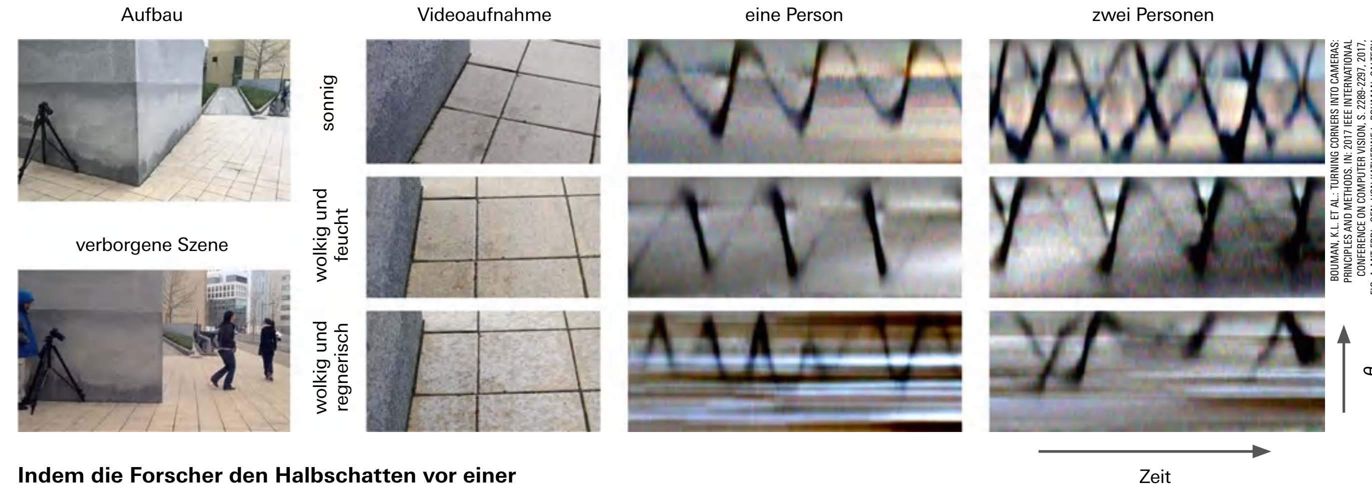
Da die Wissenschaftler vom MIT nun kleinste Farbveränderungen, Verschiebungen und Helligkeitsunterschiede aufspüren konnten, begannen sie im Oktober 2017, ihre gesammelten Erkenntnisse zu kombinieren, um weitere versteckte Informationen aufzudecken. Freemans damalige Doktorandin Katie Bouman, die jetzt am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics im US-amerikanischen Cambridge arbeitet, zeigte damals, dass sich auch Ecken und Kanten als Kameras eignen.

Fotografieren mit einer Zimmerpflanze

Wie Lochkameras und Antilochkameras auch, schränken Kanten Lichtstrahlen ein. Diese Eigenschaft nutzten Bouman und ihre Kollegen aus, als sie am helllichten Tag den Halbschatten vor einer Gebäudeecke mit herkömmlichen Aufnahmegeräten wie einem Smartphone filmten (siehe Bilder S. 62). Sie konnten so erkennen, ob sich jemand hinter der Ecke versteckte. Auf der schattigen Fläche sammeln sich nämlich Lichtstrahlen, die aus dem verborgenen Bereich stammen. Wenn etwa eine Person mit einem roten Hemd hinter der Wand entlangspaziert, projiziert das Oberteil eine winzige Menge an rotem Licht in diesen Halbschatten. Das farbige Licht fegt über die Fläche hinweg, während sich die Person bewegt – für das bloße Auge ist das nicht sichtbar, nach der digitalen Verarbeitung kann man diese Spuren jedoch deutlich erkennen.

Im Juni 2018 gingen Freeman und seine Kollegen sogar noch einen Schritt weiter und nahmen ein dreidimensionales Bild eines Raums auf, indem sie einfach nur die Schattierungen einer Zimmerpflanze auf einer Wand untersuchten. Die Blätter der Pflanze funktionierten wie Antilochkameras, die jeweils unterschiedliche Lichtstrahlen blockieren. Aus dem Kontrast zwischen dem Schatten eines Blatts und der übrigen Umgebung konnten die Forscher auf die fehlenden Strahlen schließen und so einen Teil des verborgenen Raums enthüllen. Dazu bestimmten sie zunächst die Intensität und die Richtung der Lichtstrahlen und bildeten damit das so genannte Lichtfeld ab. Freeman und sein Team setzten die unterschiedlichen Teile in einem zweiten Schritt zu einem dreidimensionalen Gesamtbild des Raums zusammen.

Der neuartige Lichtfeldansatz liefert weitaus schärfere Ergebnisse als die älteren Methoden, die Torralba und Freeman in den Jahren zuvor genutzt hatten, um die Bilder unabsichtlicher Kameras auszuwerten. Der entscheidende Grund dafür ist, dass sie die neuen Algorithmen mit Kenntnissen über unsere Welt fütterten. Die Programme enthalten beispielsweise detaillierte Informationen über die



BOUMAN, K.L. ET AL.: TURNING CORNERS INTO CAMERAS: PRINCIPLES AND METHODS. IN: 2017 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, S. 2289-2297, 2017, FIG. 4; MIT FRDL. GEN. VON KATHERINE L. BOUMAN, CALTECH

Indem die Forscher den Halbschatten vor einer Gebäudeecke filmten, konnten sie die Bewegungen versteckter Personen hinter einer Ecke mit einer einfachen Kamera nachvollziehen.

Gestalt der im Raum befindlichen Zimmerpflanze. Außerdem gaben die Informatiker vor, dass unsere Umgebung meist nur glatte Strukturen aufweist. Durch diese und andere Annahmen können die Forscher die verrauschten Bilder verbessern. Der Lichtfeldansatz »erfordert zwar viel Vorwissen über unsere Umgebung, um sie angemessen abzubilden. Dafür gibt er aber eine Menge Informationen preis«, sagt Torralba.

In all diesen Arbeiten erzeugten Torralba, Freeman und ihre Mitarbeiter Bilder, die sich schon immer in unserer Umgebung befanden. Auf der anderen Seite des Campus in Massachusetts verfolgt ihr Kollege Ramesh Raskar einen unterschiedlichen Ansatz. Durch die »aktive Bildgebung« möchte er nach eigenen Angaben die Welt verändern. Er verwendet aufwändige Systeme aus Lasern und hochauflösenden Kameras, um noch einen Schritt weiter zu gehen als seine Kollegen: Statt sich damit zu begnügen, die Präsenz einer Figur hinter einer Ecke aufzudecken, bildet er die verborgenen Objekte detailliert ab. Dazu muss er aber aktiv in die Szene eingreifen, indem er sie mit einem Laser bescheint.

Bereits 2007 hatte Raskar die entscheidende Idee für einen Versuch, den er mit seinem Team fünf Jahre später verwirklichen konnte. Dazu stellten die Wissenschaftler ein kompliziertes Laser-Kamera-System vor einer Wand auf und platzierten direkt daneben eine Figur. Sie trennten die Apparatur und das Objekt durch einen Schirm, so dass sie es nicht mehr sehen konnten. Dann schossen sie Laserpulse auf die vor ihnen befindliche Wand. Die auftreffenden Photonen prallten kreisförmig von ihr ab, wurden von der Figur hinter dem Schirm zurück an die Wand reflektiert und erreichten schließlich eine so genannte Streak-Kamera, die nach jedem abgegebenen Lichtpuls Milliarden von Bildern pro Sekunde aufnahm. Durch sie konnten die Forscher selbst einzelne Photonen auflösen (siehe Bild S. 58/59).

Allerdings mussten Raskar und seine Kollegen dazu die gesamte Wand rasterförmig scannen. Versteckt sich etwa eine Person hinter einer Gebäudeecke, »könnte Licht von einem Punkt auf dem Kopf, einem auf der Schulter und einem auf dem Knie zur gleichen Zeit die Kamera erreichen«, erklärt Raskar. »Wenn man dagegen eine Stelle gleich daneben mit dem Laser bescheint, trifft das reflektierte Laserlicht dieser drei Punkte nicht mehr zur gleichen Zeit ein.« Nach dieser aufwändigen Prozedur mussten die Wissenschaftler auch noch das komplizierte »inverse Problem« lösen: Sie brauchten eine Methode, um aus all den gesammelten und anschließend kombinierten Daten auf die genaue Form des versteckten Objekts zu schließen.

Detailreiche Bilder dank Mathematik

Der erste Algorithmus, den Raskar zu diesem Zweck entwarf, war rechnerisch überaus anspruchsvoll. Außerdem kostete die für das Experiment benötigte Apparatur eine halbe Million US-Dollar. Doch inzwischen haben Matthew O'Toole, David Lindell und Gordon Wetzstein von der Stanford University die benötigte Software vereinfacht und auch die technischen Kosten drastisch gesenkt. In einer Veröffentlichung im März 2018 setzten die drei Wissenschaftler neue Maßstäbe für eine effiziente und kostengünstige Bildgebung eines verborgenen Objekts. In ihren Versuchen benötigten sie bloß eine SPAD-Kamera (single-photon avalanche diode), die auf Halbleiterbauelementen basiert und eine niedrigere Bildrate als die teuren Streak-Kameras hat.

Was aber macht den Algorithmus der drei Wissenschaftler von der Stanford University so viel besser als die Programme, an denen Raskars Team so lange gebastelt hatte? Tatsächlich hängt der Unterschied mit dem Versuchsaufbau zusammen: Wenn die Forscher vom MIT eine Stelle an der Wand mit dem Laser beschienen, detektierten sie ausschließlich von anderen Stellen reflektierte Photonen, damit ihre Kamera nicht das direkt von der Wand zurückgestreute Licht des Lasers aufnahm. Indem O'Toole und seine Kollegen aber den Laser und ihre Kamera auf fast den gleichen Punkt an der Wand richteten, stammten die ausgehenden und ankommenden Photonen vom gleichen »Lichtkegel«. Dieser entsteht immer dann, wenn Photonen an einer Oberfläche gestreut werden: Sie prallen zunächst in alle Richtungen von dem Hindernis ab und bilden über die Zeit einen Kegel. Die Physik von Lichtkegeln entwickelte Anfang des 20. Jahrhunderts der Mathematikprofessor von Albert Einstein, Hermann Minkowski. O'Toole, der inzwischen an

der Carnegie Mellon University in Pittsburgh arbeitet, nutzte Minkowskis Erkenntnisse, um die Flugzeiten der einzelnen Photonen zu bestimmen und sie mit den Positionen der streuenden Oberfläche in Beziehung zu setzen. Durch diesen Vorgang, den er selbst Lichtkegeltransformation nennt, konnte O'Toole das inverse Problem lösen und die Form des versteckten Objekts rekonstruieren.

Die vereinfachte und günstigere Apparatur der drei Wissenschaftler stellt nun auch praktische Anwendungen in Aussicht. Autonome Fahrzeuge nutzen bereits Lidar-Systeme (light detection and ranging), die mittels Laserstrahlen Abstände und Geschwindigkeiten messen. Künftig könnte man die Autos auch mit SPAD-Kameras ausstatten, damit sie Objekte hinter Straßenecken detektieren. »In naher Zukunft werden diese (SPAD)-Sensoren in einem handlichen Format verfügbar sein«, prognostiziert Andreas Velten, Koautor von Raskars bahnbrechender Veröffentlichung aus dem Jahr 2012. Inzwischen leitet Velten eine eigene Arbeitsgruppe für aktive Bildgebung an der University of Wisconsin in Madison. Bisher konnten die Wissenschaftler aber nur »mit großer Sorgfalt ein weißes Objekt vor einem schwarzen Hintergrund aufnehmen«, so Velten. Das nächste Ziel ist, in komplexere Szenen einzusteigen und auch realistische Situationen abzubilden.

Die Forscher aus Freemans Arbeitsgruppe ließen sich durch Raskars Ansätze inspirieren. Im April 2018 haben sie begonnen, ihre passiven Methoden mit der aktiven Bildgebung zu verbinden. Dem Postdoc Christos Thrampoulidis gelang es dabei, die aufwändige Apparatur von Raskar mit einem Trick weiter zu vereinfachen. Dazu platzierte er eine Antilochkamera bekannter Form hinter einer Ecke, in die Nähe des versteckten Gegenstands. So konnten die Wissenschaftler auch ohne aufwändige Flugzeitmessungen von Photonen die verborgene Szene rekonstruieren. »Wir sollten künftig mit einer gewöhnlichen CCD-Kamera auskommen«, hofft Thrampoulidis.

Eines Tages könnten Rettungsteams, Feuerwehrleute und autonome Roboter von den neuartigen technischen Möglichkeiten profitieren. Velten arbeitet bereits mit dem Jet Propulsion Laboratory der NASA zusammen, um das Innere von Höhlen auf dem Mond aus der Ferne abzubilden. Und auch Raskar und seine Kollegen nutzten ihre Erkenntnisse, mit denen sie beispielsweise die ersten Seiten eines geschlossenen Buchs lasen oder die nähere Umgebung innerhalb eines dichten Nebels enthüllten.

Die passive Bildgebung von Freeman und Torralba könnte in Zukunft ebenfalls zu großen Fortschritten führen. Neben der Rekonstruktion von akustischen Signalen könnten die Algorithmen zur Detektion minimaler Bewegungen in medizinischen oder sicherheitstechnischen Geräten eingesetzt werden oder Astronomen dabei helfen, winzige Schwankungen in ihren Signalen zu erkennen. Der Astrophysiker David Hogg von der New York University und dem Flatiron Institute sieht Freemans Algorithmus als sehr gute Idee an. »Ich finde, wir sollten diesen Ansatz in der Astronomie verwenden«, äußert er.

Doch wie steht es mit dem Datenschutz – birgt die neue Technik nicht auch Gefahren? »Das ist ein Thema, über das ich im Lauf meiner Karriere häufig nachgedacht habe«, gibt Freeman zu. Der bebrillte Tüftler begeisterte sich schon früh für Technik; seit seiner Kindheit entwickelt er Fotografien selbst. Am Anfang seiner Karriere, erzählt er, wollte er nichts mit möglichen militärischen Anwendungen oder mit Überwachungstechniken zu tun haben. Über die Jahre kam er aber zu dem Schluss, dass »die Technologie ein Werkzeug ist, das auf viele verschiedene Arten eingesetzt werden kann. Wenn man alles meidet, was jemals einen potenziellen militärischen Nutzen haben könnte, wird man nie etwas Sinnvolles tun.« Er fügt hinzu, dass es selbst in militärischen Situationen, »sehr viele verschiedene Möglichkeiten gibt, die neuen Technologien zu verwenden. Sie könnten beispielsweise jemandem vor einem Angreifer schützen. Im Allgemeinen ist es gut zu wissen, wo sich Dinge befinden.«

Eigentlich sind es aber nicht die vielfältigen technischen Möglichkeiten, die ihn begeistern. Vielmehr fasziniert es ihn, so viele Dinge enthüllt zu haben, die sich in unserem direkten Sichtfeld verstecken. »Die Welt steckt voller Information, die es noch zu entdecken gilt«, schließt er. ◂



RAMONA KAULITZKI / STOCK.ADOBE.COM

QUELLEN

Bouman, K. L. et al.: Turning Corners into Cameras: Principles and Methods. In: 2017 IEEE International Conference on Computer Vision, S. 2289–2297, 2017

Davis, A. et al.: The Visual Microphone: Passive Recovery of Sound from Video. In: ACM Transactions on Graphics 33, 79, 2014

Torralba, A., Freeman, W.T.: Accidental Pinhole and Pinspeck Cameras: Revealing the Scene outside the Picture. In: 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 374–381, 2012

Velten, A. et al.: Recovering Three-Dimensional Shape around a Corner using Ultrafast Time-Of-Flight Imaging. In: Nature Communications 3, 745, 2012

WEPTIPP

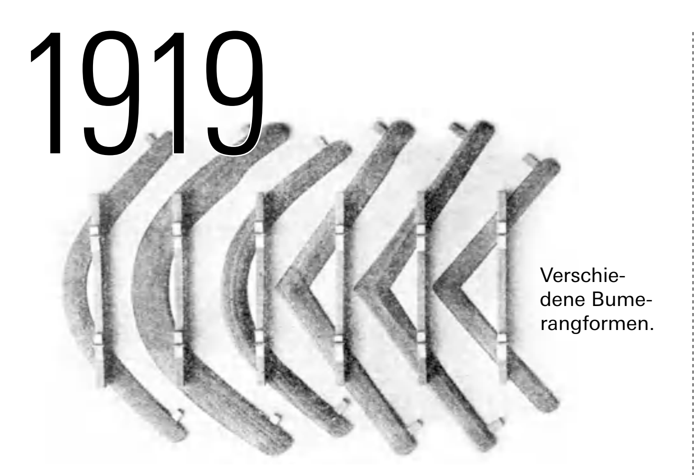
www.spektrum.de/video/neuartige-bildgebung-enthuellt-verborgene-information/1616406

Martin Rubinstein erklärt in diesem Video die Möglichkeiten der digitalen Bildgebung.

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »The New Science of Seeing around Corners« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



1919



Verschiedene Bumerangformen.

LAUNIG-LAUNISCHER FLUGKÜNSTLER

»Die arme Kultur Australiens hat uns modernen Menschen ein Spielzeug geliefert, das Staunen und Vergnügen hervorruft: es ist das Bumerang. Sogar mit schwerem Geschütz der Wissenschaft ist man den Rätseln zu Leibe gerückt, die es unsern an geradlinige Fortbewegung gewöhnten Sinnen zu stellen scheint. Man faßt das Bumerang wie eine Sichel, wirft mit leicht aufwärts gerichteter Flugbahn und sucht gleichzeitig eine Eigendrehung zu verleihen. Dann fliegt [es] zunächst gerade aus, biegt aber bald links aus, steigt an und wirbelt auf den Werfer zurück.« *Kosmos 3, S. 96*

GROSSE PILOTENHERZEN

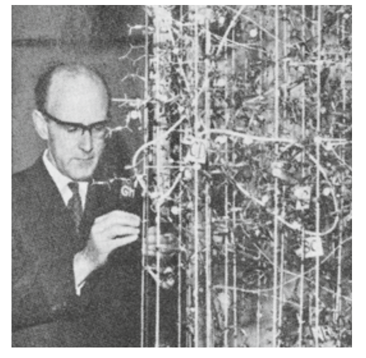
»Nach Berichten von Etienne, Lamy und Castex führt der mit der Höhe stark wechselnde Luftdruck zu krankhaften Erscheinungen bei fast allen Fliegern. Insbesondere wird fast stets Hypertrophie (Vergrößerung) des Herzens beobachtet, die in den ersten Monaten der Fliegertätigkeit rasche Fortschritte macht. Das stärkste Auftreten der [so genannten Fliegerkrankheit] wurde bei Jagd- und Bombenfliegern festgestellt, die in 5000 – 6000 m Höhe zu fliegen pflegen. Der gesteigerte Blutdruck führt häufig auch zur Hytertrophie der Leber, und der verminderte Blutdruck bei raschem Fallen führt vielfach Bewußtlosigkeit herbei.« *Prometheus 1531, S. 176*

EINE BRENNENDE ALTERNATIVE

»Die Kohlenfrage ist nicht nur in Deutschland zu einer – im wahren Sinne des Wortes – ›brennenden‹ geworden. So hofft man durch Ausbeutung der kurz vor Kriegsausbruch in Siebenbürgen und im ungarischen Tiefland entdeckten Quellen Städte und Industriebezirke verhältnismässig unabhängig von der Kohleneinfuhr zu machen. Die Gasquellen Siebenbürgens sind auf 216 Milliarden cbm geschätzt worden. Der Heizwert wird mit dem der Cardiffkohle verglichen. Es wird beabsichtigt, das Naturgas nicht bloß für industrielle Zwecke, sondern auch für die Strassenbeleuchtung nutzbar zu machen. Ausserdem kann das Gas als Rohstoff für chemische Industriezweige dienen.« *Gesundheit 3, S. 54*

1969

LEUCHTENDES MODELL DES BLUTFARBSTOFFS



Komplexes Modell des Hämoglobins.

»Nachdem [der Nobelpreisträger M. F.] Perutz schon vor einigen Jahren Modelle des Myoglobins präsentieren konnte, stellte er neuerdings das komplette Molekül des Oxyhämoglobins vom Pferd als Blockmodell im Maßstab 2 cm = 1 Å vor. Das Ergebnis der diffizilen Auswertung zahlreicher Röntgengitteraufnahmen durch Fourier-Analysen führt zu einem verknäulten Gebilde. Zu Vorführungszwecken hat Prof. Perutz ein [Modell] aus Schläuchen und Drähten konstruiert (Bild), in dem er die wichtigen Gruppierungen als Lämpchen aufleuchten lassen kann. Besonders wichtig ist [es] für die Frage, durch welche Verschiebungen einzelner Gruppierungen das Hämoglobin in die Lage versetzt wird, seine Funktionen zu erfüllen; das ist einmal Bindung und Abgabe des Sauerstoffes und andererseits die damit verbundene Änderung der Säurestärke des Moleküls.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 3, S. 122*

GLÜCK BRINGENDE MUTANTEN

»Vielblättriger Klee ist tatsächlich eine außerordentliche Rarität. Die Höchstzahlen der Blätter, die an einem Stiel gezählt wurden, schwanken zwischen zehn und zwölf. Vielleicht ist die Deutung kühn und dennoch wahr, es handle sich hierbei um eine Art von Rückschlagsmutation zu heute nicht mehr existenten Formen. Den Trägern des entsprechenden Erbgutes scheint sie jedoch keinen Auslesevorteil zu bringen; sonst wären vielblättrige Klee-Individuen häufiger. Dennoch schärfen sie – mystisch als Glücksbringer umwoben – unser Beobachtungsvermögen in der Natur.« *Kosmos 3, S. 132*

ZUM GEBURTSTAG EINE REVOLUTION: DER DIGITALE BUCHDRUCK

»Vor 500 Jahren starb Johannes Gutenberg, der Erfinder der beweglichen Lettern. Erst jetzt bahnt sich mit dem Lichtsatz eine Entwicklung an, die den bisher gebräuchlichen Bleisatz durch materielose Schrift ersetzt. Das erste Buch, das in rein elektronischem Satz in Europa hergestellt worden ist, ist kürzlich erschienen. Die ›Digiset‹-Lichtsetzanlage, mit der die Filme für das im Offsetverfahren gedruckte Buch angefertigt werden, ist mit einem Computer ausgerüstet. Das elektronische Zeitalter hat damit auch in der Druckerei begonnen.« *Neuheiten und Erfindungen 387, S. 40*

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
HILBERT UND ISABELLE

Eine Gruppe von Jungforschern hat die Lösung für eines der Jahrhundertprobleme des berühmten David Hilbert bestätigt. Dabei nutzten sie ein Mittel, von dem Hilbert wohl nicht zu träumen gewagt hätte: die Software »Isabelle«. Weiteren drei Nachwuchswissenschaftlern gelang es, die für dieses Ergebnis zentralen diophantischen Gleichungen zu optimieren.

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war bis 2018 Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

spektrum.de/artikel/1621174

Als Thomas Hales 1998 die seit 400 Jahren offene keplersche Vermutung bewies – es ist unmöglich, gleich große Kugeln dichter zu packen, als die Orangenhändler das seit jeher tun –, war zunächst der Jubel groß (siehe **Spektrum** April 1999, S. 10). Dann kam die Ernüchterung: Der Beweis erstreckte sich nicht nur über mehrere hundert Seiten, sondern war auch so chaotisch formuliert, dass die größten Meister der Mathematik sich außer Stande sahen, seine Richtigkeit zu beurteilen (siehe **Spektrum** September 2003, S. 13).

Die naheliegende Forderung, das ganze Zeug ordentlich aufzuschreiben, lehnte Hales zunächst ab. Nochmals mehrere Jahre mit der Bestätigung eines aus seiner Sicht bereits erbrachten Resultats zubringen? Da hätte er Besseres zu tun. Doch schließlich fand er sich immerhin bereit, die knechtische Arbeit an einen Computer zu delegieren. Das geht zwar nicht unbedingt schneller: Es ist überaus mühsam, eine Aussage und ihren Beweis so zu formalisieren, dass eine eigens dafür geschriebene Software, ein »Beweisassistent«, jeden einzelnen gedanklichen Schritt auf gewisse Grundaxiome zurückführen und damit verifizieren kann. Aber es verschafft dem ganzen Werk, sei es für Menschen durchschaubar oder auch nicht, den ersehnten Nachweis der Korrektheit. In diesem Fall dauerte es mehr als ein Jahrzehnt: Erst am 14. August 2014 meldete das Projekt Flyspeck (»Fliegenschiss«) Vollzug.

Damit ging, zumindest für diesen Einzelfall, ein Traum des großen Mathematikers David Hilbert (1862–1943) in Erfüllung. Hilbert hat nicht nur im Jahr 1900 die berühmt gewordene Liste seiner 23 Probleme vorgelegt und damit eine Art Arbeitsprogramm für die Mathematik des anbrechenden 20. Jahrhunderts formuliert. Er war darüber hinaus der Überzeugung, man könne den mathematischen Beweis von allen Unvollkommenheiten des menschlichen Denkens befreien, indem man die Ausführung all seiner logischen Schritte an ein »mechanisches Verfahren« überträgt – in heutiger Sprache: an einen Computer. Das würde die Gewissheit, die ein solcher Beweis vermittelt, auf eine neue Stufe heben. Und drittens gebe es keine grundsätzliche Schranke der Erkenntnis: Es werde möglich sein, jede vorgelegte mathematische Aussage entweder zu beweisen oder zu widerlegen.

Was die letzte Prognose angeht, so platzte Hilberts Traum bereits zu seinen Lebzeiten. Mit den berühmt gewordenen Unvollständigkeitssätzen bewies Kurt Gödel Anfang der 1930er Jahre, dass es grundsätzlich unbeweisbare mathematische Aussagen gibt. Nur wenige Jahre später gelang es Alonzo Church und Alan Turing, diese Unmöglichkeit in eine Aussage über Computerprogramme umzusetzen – wohlgemerkt, bevor es Computer gab (siehe **Spektrum** September 2017, S. 72). Die übliche Formulierung lautet: »Das Halteproblem ist unlösbar.« Das heißt, es kann kein Computerprogramm geben, das zu jedem vorgelegten Computerprogramm entscheidet, ob dieses jemals anhalten wird oder nicht.

Vor diesem Hintergrund hätte das Ergebnis, von dem hier die Rede sein soll, beim großen Hilbert sicherlich äußerst gemischte Gefühle erregt. Einerseits ist damit das

Diophantische Mengen

Jede endliche Menge natürlicher Zahlen, sagen wir $\{a_1, a_2, \dots a_n\}$, ist diophantisch, denn die Nullstellen von $(x - a_1) \cdot (x - a_2) \cdot \ldots \cdot (x - a_n)$ sind genau die Zahlen $a_1, a_2, \dots a_n$.

Die Menge aller zusammengesetzten Zahlen, also solcher, die nicht Primzahlen sind, lässt sich durch die Gleichung $a - (x_1 + 2) \cdot (x_2 + 2) = 0$ darstellen. Das »+ 2« in beiden Klammern erzwingt, dass a in (mindestens) zwei Faktoren zerlegbar ist, die beide größer als eins sind.

Selbst die Menge aller natürlichen Zahlen, die keine Zweierpotenzen sind, hat eine diophantische Darstellung, nämlich $a - (2x_1 + 3) \cdot x_2 = 0$. Wie das? Nun ja, jede Zahl, die nicht gerade eine Zweierpotenz ist, hat mindestens einen ungeraden Teiler, der größer als eins ist. Wenn a eine Primzahl ist, muss man $x_2 = 1$ wählen.

Ein bisschen komplizierter fällt die Darstellung aller natürlichen Zahlen aus, die keine Quadratzahlen sind:
$(a - z^2 - x - 1)^2 + ((z + 1)^2 - a - y - 1)^2 = 0$. Diese Gleichung kann nur dann den Wert null annehmen, wenn beide quadrierten Klammerausdrücke null sind; damit fasst man zwei Forderungen an den Parameter a in eine zusammen. In diesem Fall lautet die erste Forderung $a = z^2 + x + 1$; die kann nur erfüllt sein, wenn a um mindestens eins größer ist als eine Quadratzahl z^2. Die zweite Forderung $a + y + 1 = (z + 1)^2$ sagt aus, dass a kleiner sein muss als die nächstgrößere Quadratzahl $(z + 1)^2$. Also kann a keine Quadratzahl sein.

Problem mit der Nummer 10 aus seiner Liste von 1900 erledigt worden: »Man gebe ein Verfahren an, das für eine beliebige diophantische Gleichung entscheidet, ob sie lösbar ist.« Andererseits besteht die Antwort nicht in der Angabe eines Entscheidungsverfahrens, sondern in dem Nachweis, dass es ein solches nicht geben kann.

Der Beweis wird gewissermaßen rückwärts aufgezogen. Man zeigt zuerst, dass diophantische Gleichungen überaus mächtige theoretische Werkzeuge sind. Mit ihrer Hilfe lässt sich eine unglaubliche Fülle an mathematischen Sachverhalten ausdrücken, was eigentlich erfreulich ist. Nur sind unter diesen Sachverhalten auch nachweislich unbeweisbare. Also könnte ein Verfahren, das die Lösbarkeit jeder diophantischen Gleichung entscheidet, unlösbare Probleme lösen, darunter das Halteproblem. Daraus folgt, dass ein solches Verfahren nicht existieren kann.

Der Beweis, dass man mit diophantischen Gleichungen dermaßen viel ausdrücken kann, geht seinerseits einen langen Weg. Nach Vorarbeiten von den US-amerikanischen Wissenschaftlern Martin Davis, Hilary Putnam und Julia Robinson setzte 1970 der russische Mathematiker Juri Wladimirowitsch Matijassewitsch im zarten Alter von 22 Jahren den Schlussstein an eine umfangreiche Gedankenkette, die heute nach den Initialen ihrer Entdecker als DPRM-Theorem bezeichnet wird.

Fast ein halbes Jahrhundert später reicht nun Matijassewitsch – dessen Namen inzwischen jeder in der englischen Transliteration »Yuri Matiyasevich« schreibt – den Stab gewissermaßen an die junge Generation weiter. Eine Gruppe engagierter Studenten an der Jacobs University in Bremen, angeleitet von ihrem Betreuer Dierk Schleicher, hatte bei Matiyasevich die Einzelheiten zum Beweis des DPRM-Theorems gelernt. Nun machte sie sich daran, ihn zu formalisieren, mit Hilfe eines Beweisassistenten namens »Isabelle«, der auch schon beim Projekt Flyspeck zum Einsatz kam. Die wesentlichen Schritte dieses langwierigen Unterfangens haben die Studenten schon bewältigt. Dafür gab es 2018 einen ersten Preis beim Bundeswettbewerb »Jugend forscht« (siehe Bild S. 68); und die Arbeit geht weiter. Am Ende werden sie Hilberts zehntes Problem mit dem von Hilbert erträumten Mittel gelöst haben – nur eben mit negativem Ergebnis.

Jene Forscher, die sich vorrangig mit der Erstellung von Beweisassistenten beschäftigen, sind von dem Projekt nicht zuletzt deshalb beeindruckt, weil es das erste substanzielle seiner Art ist, das nicht aus dem eigenen Stall kommt. Offensichtlich sind ihre Methoden jetzt endlich so ausgereift, dass auch »echte Mathematiker« sie nutzen können.

Das Erbe des Diophantos von Alexandria

Was ist eine diophantische Gleichung? Zunächst ein algebraischer Ausdruck mit im Allgemeinen mehreren Unbekannten, die man mit $x, y, z \dots$ oder auch $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ zu bezeichnen pflegt. Man darf die Unbekannten mit sich selbst, miteinander und mit ganzen Zahlen multiplizieren und diese Produkte addieren. Einen solchen Ausdruck nennt man ein Polynom mit den Variablen $x_1, \dots, x_n$. Wenn man geeignete Zahlenwerte für die Unbekannten einsetzt, soll null herauskommen.

Wenn die Unbekannten gewöhnliche reelle Zahlen sein sollen, ist es meist nicht besonders schwer zu entscheiden, ob eine Lösung der Gleichung oder, was dasselbe ist, eine Nullstelle des Polynoms existiert oder nicht. Aber in der Nachfolge des antiken Mathematikers Diophantos von Alexandria lässt man bei den Gleichungen, die seinen Namen tragen, nur natürliche Zahlen als Werte für die Unbekannten zu. Und damit wird die Frage nach der Existenz von Lösungen alles andere als einfach.

Die diophantische Gleichung $x_1^2 + x_2^2 - x_3^2 = 0$ hat sehr viele Lösungen, die als pythagoräische Tripel bekannt sind. Die Gleichung $x_1^3 + x_2^3 - x_3^3 = 0$ hat gar keine Lösung, und dasselbe gilt, wenn man an die Stelle der 3 irgendeinen größeren Exponenten setzt. Das ist die Aussage des großen Satzes von Fermat, und der war offensichtlich etwas schwieriger zu beweisen. Immerhin haben die Mathematiker ungefähr 350 Jahre dafür gebraucht.

Es erweist sich als sinnvoll, diophantische Gleichungen nicht einzeln zu studieren, sondern ganze Klassen auf einmal zu betrachten. Die Gleichung $x^2 - 4 = 0$ ist lösbar

(die einzige Lösung lautet $x = 2$, denn wir suchen ja nur unter den natürlichen Zahlen), $x^2 - 5 = 0$ nicht, denn die Wurzel aus 5 ist keine ganze Zahl, und statt das für alle natürlichen Zahlen einzeln aufzuschreiben, betrachtet man die allgemeine Gleichung $x^2 - a = 0$ mit der Maßgabe, dass der Parameter a nur natürliche Zahlen als Werte annehmen darf. Die Aussage über die Lösbarkeit aller Gleichungen dieser Klasse läuft dann auf die Angabe derjenigen natürlichen Zahlen a hinaus, für welche diese »parametrische diophantische Gleichung« eine Lösung hat. In obigem Beispiel ist das die Menge der Quadratzahlen {0, 1, 4, 9, 16, …} (in diesem Kontext pflegt man die Null als natürliche Zahl aufzufassen). Man kommt also von einer parametrischen diophantischen Gleichung auf eine Teilmenge der natürlichen Zahlen, nämlich die Menge aller Parameter a, für welche die Gleichung lösbar ist. Mengen, die auf diese Weise definiert sind, nennt man diophantische Mengen. Und alsbald stellt sich die umgekehrte Frage: Welche Teilmengen der natürlichen Zahlen sind diophantisch? Wie findet man zu einer solchen Teilmenge eine parametrische diophantische Gleichung, die diese Menge »darstellt«, das heißt genau für die Parameter, die Elemente der Menge sind, eine Lösung hat?

Eine vorläufige Antwort lautet: Es gibt erstaunlich viele diophantische Mengen (siehe »Diophantische Mengen«, S. 67). Doch das Komplement einer solchen Menge, also die Menge aller natürlichen Zahlen, die nicht einer diophantischen Menge angehören, ist deswegen noch lange nicht diophantisch. Die Menge der Quadratzahlen war ziemlich einfach darzustellen, die Menge der Nichtquadratzahlen schon deutlich schwieriger. Die Menge der Nichtprimzahlen wird durch eine recht simple Gleichung ausgedrückt; und die Menge der Primzahlen? Um die Antwort vorwegzunehmen: Sie ist diophantisch, aber von einer unkomplizierten Darstellung kann keine Rede sein.



STIFTUNG JUGEND FORSCHT E.V. (WWW.JUGEND-FORSCHT.DE/PROJEKTDATENBANK/HILBERT-MEETS-ISABELLE.HTML)

Benedikt Stock (links), Abhik Pal (Mitte) und Marco David, Studienanfänger an der Jacobs University in Bremen, haben für die Formalisierung der Lösung von Hilberts zehntem Problem beim Wettbewerb »Jugend forscht« 2018 nicht nur den fächerübergreifenden Bundessieg des Bundespräsidenten errungen, sondern auch mehrere Zusatzpreise erhalten.

Aufzählbare Mengen und das Halteproblem

Man kommt dem Kern des Problems näher, wenn man sich ein Computerprogramm vorstellt, das zu einer gegebenen Gleichung sämtliche Elemente der zugehörigen diophantischen Menge findet. Das Programm setzt alle möglichen Werte des Parameters sowie aller Unbekannten in die Gleichung ein, berechnet das Ergebnis und meldet jedes Mal, wenn null herauskommt, den aktuellen Wert des Parameters a; alle so gemeldeten Zahlen bilden die diophantische Menge.

Aber es sind doch unendlich viele Kombinationen von Parametern und Unbekannten auszuprobieren? Schon richtig; allerdings handelt es sich um die milde Form von Unendlichkeit, die man von den natürlichen Zahlen kennt (»abzählbar unendlich«). Ein Programm, das für alle natürlichen Zahlen etwas tut, läuft zwar unendlich lang; doch jede einzelne Zahl kommt nach endlicher Zeit an die Reihe. Das funktioniert auch, wenn alle Kombinationen von $n + 1$ natürlichen Zahlen (ein Parameter und n Unbekannte) durchzuprobieren sind. Man muss diese Versuche nur in eine geschickte Reihenfolge bringen. Zuerst alle Kombinationen, bei denen die Summe aus sämtlichen Variablen plus Parameter gleich null ist. Davon gibt es eine einzige, hier sind alle gleich null. Danach alle Kombinationen mit Summe eins – das sind schon etwas mehr –, alle mit Summe zwei und so weiter. Dann läuft das Programm immer noch unendlich lang; es wirft jedoch jedes Element der diophantischen Menge in endlicher Zeit aus.

Für praktische Zwecke wäre ein solches Programm völlig unbrauchbar. Die Elemente kommen nicht der Reihe nach aus dem Computer, manche werden mehrfach ausgegeben, und man hat keine Chance abzuschätzen, wie lange man auf ein bestimmtes von ihnen warten muss. Doch davon darf man sich nicht entmutigen lassen. Hier geht es um den feinen, aber entscheidenden Unterschied zwischen unendlicher und endlicher, wenn auch unkalkulierbar langer Wartezeit. Man kann sich zu jedem Zeitpunkt sicher sein, dass die bislang gefundenen Zahlen zur Menge gehören; ob eine der restlichen Zahlen allerdings noch das Gütesiegel bekommen wird, ist ungewiss und wird das für unbestimmte Zeit bleiben.

Eine Menge, für die ein solches Verfahren existiert – also eines, das auf die Dauer jedes Element der Menge findet, wenn auch nicht der Reihe nach und möglicherweise mit Wiederholungen –, nennt man aufzählbar. Rekursiv aufzählbar, um genau zu sein; was das im Einzelnen bedeutet, braucht uns hier nicht zu kümmern. Das oben beschriebene Verfahren zeigt, dass jede diophantische Menge aufzählbar ist.

Die Aussage des DPRM-Theorems lässt sich nun kurz und elegant so formulieren: Jede aufzählbare Menge ist diophantisch.

Als Davis das 1953 als Vermutung formulierte, begegnete man ihm zunächst mit großer Skepsis. Es gibt sehr viele aufzählbare Mengen, darunter so problematische wie die Menge der Primzahlen; dass jede von ihnen durch diophantische Gleichungen darstellbar sein sollte, schien kaum vorstellbar.

Insbesondere ist die Menge aller anhaltenden Programme aufzählbar. Das klingt zunächst merkwürdig, weil man sich unter einem Programm nicht unbedingt eine natürliche Zahl vorstellt. Aber selbst in modernen Programmiersprachen ist ein Programm nichts weiter als ein binärer Datenstrom, eine Folge von Nullen und Einsen; und die kann man mühelos als im Binärsystem geschriebene natürliche Zahl interpretieren. Das gilt erst recht für jenen Computer, den die theoretischen Informatiker so schätzen, weil seine Hardware auf das Allernotwendigste reduziert ist, nämlich die Turing-Maschine, sowie die zugehörigen Programme.

Ein Programm, das jedes anhaltende Programm aufzählt, würde ungefähr so vorgehen: Es lädt zunächst alle – endlich vielen – Programme unterhalb einer gewissen Länge in den »Arbeitsspeicher« des Computers. (So etwas hat eine Turing-Maschine zwar nicht wirklich, aber da sie im Prinzip alles kann, was ein moderner Computer kann, ist sie auch in der Lage, die Funktionen eines Arbeitsspeichers zu erfüllen.) Dann lässt es der Reihe nach jedes Programm im Arbeitsspeicher ein paar Schritte laufen. Wenn eines von ihnen anhält, gibt er es aus – das heißt die natürliche Zahl, die dem Programmtext entspricht –, wirft es aus dem Arbeitsspeicher und lässt die übrigen weitermachen. Nachdem eine gewisse Zeit vergangen ist, lädt das Aufzählprogramm die nächstlängeren Programme in den Arbeitsspeicher, teilt ihnen ebenfalls der Reihe nach Rechenzeit zu, und so weiter. Der Arbeitsspeicher ist im Prinzip unbegrenzt, die Zeit auch – unter derart realitätsfernen Voraussetzungen wird das Aufzählprogramm jedes anhaltende Programm irgendwann ausgeben.

Damit ist wohlgemerkt das Halteproblem nicht gelöst! Denn zu jedem Zeitpunkt sitzen im Arbeitsspeicher der gedachten Turing-Maschine etliche Programme und warten fleißig rechnend auf ihr Ende. Und von keinem von ihnen kann man wissen, wann und ob überhaupt dieses Ende eintreten wird.



STIFTUNG JUGEND FORSCHT E.V. (WWW.JUGEND-FORSCHT.DE/PROJEKTDATENBANK/OPTIMIERUNG-DIOPHANTISCHER-GLEICHUNGEN.HTML)

Jonas Bayer (links), Malte Haßler (Mitte) und Simon Dubischar aus Bremen erhielten für ihre Arbeit »Optimierung diophantischer Gleichungen« den dritten Preis beim Bundeswettbewerb »Jugend forscht« 2018. Bayer und Haßler waren ebenfalls Studienanfänger, Dubischar sogar noch Schüler.

Registermaschinen und die Umsetzung eines Computerprogramms in ein Polynom

Bei der starken Aussage, die das DPRM-Theorem macht, verwundert es wenig, dass sein Beweis einen erheblichen theoretischen Aufwand erfordert. Im Prinzip ist er konstruktiv, das bedeutet, er liefert eine Anweisung, wie man zu einem gegebenen Aufzählprogramm in einer endlichen Zahl von Schritten eine parametrische diophantische Gleichung bastelt, die für genau die Parameter eine Lösung hat, die das Aufzählprogramm – irgendwann! – ausgibt. Die einzelnen Schritte sind allerdings, vorsichtig ausgedrückt, nicht ganz trivial und können deshalb hier nur andeutungsweise beschrieben werden.

Es beginnt mit der Formulierung des Aufzählprogramms. Normalerweise würden die theoretischen Informatiker ein solches Programm für eine Turing-Maschine schreiben; denn dieses bestünde ausschließlich aus Befehlen einer einzigen Art, was deren Umsetzung in Polynome sehr erleichtern würde. Für den Beweis des DPRM-Theorems erweist sich jedoch ein weniger primitiver Computer als zweckmäßiger. Diese »Registermaschine« kommt einem echten Rechner sogar deutlich näher, selbst wenn niemand auf die Idee käme, so ein Gerät für praktische Zwecke zu verwenden. Tatsächlich sind Theoretiker ziemlich frei in der Wahl ihres – ohnehin fiktiven – Rechners, solange dieser so viel kann wie eine Turing-Maschine.

Eine Registermaschine verfügt über eine gewisse Anzahl an Speicherplätzen, die Register, die jeweils eine natürliche Zahl enthalten, und kann sich in endlich vielen verschiedenen inneren Zuständen befinden. Die Befehle, die man ihr erteilen kann, sind von dreierlei Art:

- Wenn du im Zustand k bist, setze Register m eins hoch und gehe in den Zustand i über.
- Wenn du im Zustand k bist, setze Register m eins herunter und gehe in den Zustand i über – wenn das möglich ist; wenn in Register m schon eine Null steht, lass diesen Wert unverändert und gehe in Zustand j über.
- Wenn du im Zustand k bist, halte an.

Für jeden Zustand k, in dem sich die Maschine befindet, muss das Programm einen solchen Befehl vorsehen. Dabei sind für die Zahlen i, j und m im Allgemeinen verschiedene Werte einzusetzen.

Die Registermaschine erhält nun als Input eine Zahl a und ist so programmiert, dass sie genau dann anhält, wenn a unter den Zahlen ist, die das Aufzählprogramm irgendwann auswirft. Unter dieser Bedingung leistet sie im Prinzip dasselbe wie das Aufzählprogramm selbst.

Man stellt sich jetzt vor, dass die gedachte Registermaschine jeden Programmschritt, also den eigenen Zustand und die Inhalte aller Register, protokolliert, und zwar spaltenweise von rechts nach links. Die äußerste rechte Spalte des Protokolls beschreibt den »Urzustand« beim Programmstart, mit der Zahl *a* im ersten Register. Mit jedem Schritt kommt eine Spalte nach links dazu. Wenn die Maschine angehalten hat, steht in jeder Zeile des Protokolls eine Folge natürlicher Zahlen; die interpretiert man als eine einzige Zahl in einem Zahlensystem mit hinreichend großer Basis. Wären zum Beispiel alle Protokolleinträge einer Zeile kleiner als zehn, so könnte man sie einfach hintereinanderschreiben und als vielstellige Zahl im gewöhnlichen Dezimalsystem verstehen. Da die Einträge im Allgemeinen größer als zehn werden, muss man eine entsprechend größere Basis verwenden. Die so gewonnenen Zahlen sind, ebenso wie deren einzelne Ziffern, Funktionen des Inputs *a*.

Aus ihnen möchte man nun ein Polynom basteln, das neben *a* noch mehrere Variablen enthalten darf und genau dann eine Nullstelle hat, wenn die Registermaschine mit Input *a* anhält. Was bei dieser Prozedur herauskommt, ist jedoch zunächst nicht ein Polynom, sondern eine allgemeinere Funktion, bei der die Variablen auch im Exponenten stehen dürfen. Ausdrücke wie x^y sind also innerhalb eines solchen algebraischen Ausdrucks erlaubt.

So weit waren Davis, Putnam und Robinson gekommen. Dem russischen Mathematiker Matiyasevich gelang es nun, zu jedem verallgemeinerten Polynom ein gewöhnliches – ohne Variablen im Exponenten – zu finden, das dieselben Nullstellen hat.

Der Beweis von Fermats großem Satz als Spezialfall eines Verfahrens?

Um diese ganze Argumentationskette für den Beweisassistenten aufzubereiten, mussten die Jungstudenten vor allem den Übergang von einer Registermaschine zu geeigneten Gleichungen formalisieren. Der neue Zustand eines Registers ist gleich dem alten Zustand – plus oder minus eins, wenn eine entsprechende Instruktion auf das Register gewirkt hat. Diese Veränderung schreibt man als Summe aus lauter Zahlen, die gleich null, eins oder minus eins sein können, abhängig vom bisherigen Zustand der Registermaschine. Um das alles in Form von Polynomgleichungen auszudrücken, so dass ein Beweisassistent es nachvollziehen kann, muss man enorm viel Programmierarbeit leisten.

Matiyasevichs Beitrag zum DPRM-Theorem hat einen interessanten Nebeneffekt. Nachdem wir nun wissen, dass man »exponentiell diophantische Gleichungen«, das heißt solche, in denen Variablen im Exponenten erlaubt sind, durch gewöhnliche diophantische ersetzen kann, sind die Ausdrucksmöglichkeiten der letzteren noch einmal wesentlich größer, als man bisher gedacht hatte. Insbesondere ist $x^n + y^n - z^n = 0$, die Gleichung zum großen fermatschen Satz, exponentiell diophantisch.

Man stelle sich vor, Hilbert hätte mit seiner Vermutung zu seinem zehnten Problem Recht gehabt und es gäbe ein

Das Primzahlen erzeugende Polynom

Die Menge aller Primzahlen ist identisch mit der Menge aller positiven Werte, die das Polynom

$$
\begin{aligned}
(k+2)\Big\{1 &- [wx+h+j-q]^2 \\
&- [(gk+2g+k+1)(h+j)+h-z]^2 \\
&- [2n+p+q+z-e]^2 \\
&- \left[16(k+1)^3(k+2)(n+1)^2+1-f^2\right]^2 \\
&- \left[e^3(e+2)(a+1)^2+1-o^2\right]^2 \\
&- \left[(a^2-1)y^2+1-x^2\right]^2 \\
&- \left[16r^2y^4(a^2-1)+1-u^2\right]^2 \\
&- [n+\ell+v-y]^2 \\
&- \left[((a+u^2(u^2-a))^2-1)(n+4dy)^2+1-(x+cu)^2\right]^2 \\
&- \left[(a^2-1)\ell^2+1-m^2\right]^2 \\
&- \left[q+y(a-p-1)+s(2ap+2a-p^2-2p-2)-x\right]^2 \\
&- \left[z+p\ell(a-p)+t(2ap-p^2-1)-pm\right]^2 \\
&- [ai+k+1-\ell-i]^2 \\
&- \left[p+\ell(a-n-1)+b(2an+2a-n^2-2n-2)-m\right]^2\Big\}
\end{aligned}
$$

annimmt, wenn seine 26 Variablen *a*, *b*, *c*, …, *z* alle nichtnegativen ganzen Zahlen durchlaufen. Diesen Satz haben James P. Jones von der University of Calgary (Kanada) und drei seiner Fachkollegen 1976 bewiesen. Sie zeigten auch, dass man den Grad des Polynoms von 9 bis auf 5 erniedrigen kann, um den Preis, dass die Anzahl der Variablen von 26 auf 42 anwächst. Umgekehrt kommt man mit 12 Variablen aus, wenn man dafür einen sehr hohen Grad in Kauf nimmt.

Zwischen den geschweiften Klammern steht eins minus eine Summe von Quadraten. Dieser Ausdruck kann nur dann positiv sein, wenn jeder der 14 Ausdrücke in eckigen Klammern gleich null ist. Genau dann also ist $k + 2$ eine Primzahl. Die Konstruktion dieser 14 Ausdrücke, schreiben Jones und seine Kollegen, erfordert praktisch alle Techniken, die zum Beweis des DPRM-Theorems anzuwenden waren – aussichtslos, das im Einzelnen nachzuvollziehen.

Zur Produktion von Primzahlen ist die Formel denn auch denkbar ungeeignet: Wenn man systematisch alle Kombinationen der 26 Variablen durchprobiert, kommt in der überwältigenden Mehrheit der Fälle eine negative Zahl heraus.

Verfahren, das die Lösbarkeit jeder diophantischen Gleichung bestimmt. Dann wäre der Beweis des großen fermatschen Satzes nur eine spezielle Anwendung des Verfahrens, und dieses würde obendrein, quasi nebenher, zahlreiche andere harte Probleme der Zahlentheorie gleich miterledigen. Das ist schwer vorstellbar, und die Suche ist ja auch aussichtslos, wie wir inzwischen wissen. Also lohnt es sich weiterhin, sich auf Spezialfälle wie beispielsweise die Goldbach-Vermutung zu konzentrieren.

Diophantische Gleichungen optimieren

Polynome lassen sich trefflich manipulieren: Man kann sie addieren, multiplizieren, ineinander einsetzen, Variablen durch Kombinationen anderer ersetzen und etliches mehr. Von diesen Möglichkeiten machen die Theorie der diophantischen Gleichungen im Allgemeinen und der Beweis des DPRM-Theorems im Besonderen intensiv Gebrauch. Die Polynome, die dabei herauskommen, bieten im Allgemeinen keinen schönen Anblick; aber man kann sie »aufräumen«. Durch weitere Manipulationen gelingt es, die Anzahl der Variablen oder den Grad des Polynoms, also die höchste vorkommende Potenz, in Grenzen zu halten. Auch dafür hat es eine »Jugend forscht«-Arbeit 2018 bis in den Bundeswettbewerb geschafft (siehe Bild S. 69).

Ein interessantes Ergebnis solcher Aufräumarbeit ist eine diophantische Gleichung, welche die Menge aller Primzahlen darstellt. Da diese Menge aufzählbar ist – jeder Programmieranfänger schreibt als Übungsaufgabe einen entsprechenden Algorithmus –, existiert eine solche Gleichung und ist sogar über das DPRM-Theorem konstruierbar. Doch bis sie eine ansehnliche Gestalt annimmt, ist noch viel Nacharbeit erforderlich. Mit etwas zusätzlichem Umformungsaufwand kann man daraus sogar ein Polynom machen, das als positive Werte sämtliche Primzahlen annimmt und keine anderen (siehe »Das Primzahlen erzeugende Polynom«, links).

Die Einschränkung auf positive Werte ist wesentlich. Man kann nämlich beweisen, dass es kein Polynom geben kann, das – ohne Berücksichtigung des Vorzeichens – ausschließlich Primzahlen als Werte annimmt. Dass es ein solches Polynom gibt, wenn man sich auf positive Werte beschränkt, mochten die Fachleute zunächst nicht glauben. Eher waren sie bereit, die Vermutung von Davis anzuzweifeln – und mussten sich durch deren Beweis eines Besseren belehren lassen. ◂

QUELLEN

Jones, J. P. et al.: Diophantine Representation of the Set of Prime Numbers. In: The American Mathematical Monthly 83, S. 449–464, 1976

Matiyasevich, Y.: On Hilbert's Tenth Problem. Lecture notes, Pacific Institute for the Mathematical Sciences, 2000. Online unter www.mathtube.org/sites/default/files/lecture-notes/Matiyasevich.pdf

INTERVIEW
VON DER KRYPTOGRAFIE ZUM WELTFRIEDEN

Martin Hellman geriet mit dem Geheimdienst in Konflikt. Er hielt der Bedrohung nicht nur stand, sondern überzeugte die Gegenseite sogar ein Stück weit von seiner Position. Ein Gespräch über Kryptografie, gegenseitige Verteufelung und vertrauensbildende Maßnahmen in internationalen Beziehungen.

⏩ spektrum.de/artikel/1621176

Vor 40 Jahren erschien Ihr Artikel »Die Mathematik neuer Verschlüsselungssysteme« in Spektrum. Wie hat sich Ihre Forschung seitdem weiterentwickelt?
1979, das waren andere Zeiten! Das Internet gab es noch nicht, es war nicht einmal richtig vorstellbar. Immerhin: Anfang der 1980er Jahre sagte ich einmal zu einem Kollegen, man würde sich in ferner Zukunft ein Brot kaufen und auf elektronischem Weg bezahlen können. Damals war das eine seltsame Idee; es gab zwar schon elektronische Überweisungen, aber die wurden eher für Millionenbeträge verwendet.

Was ich überhaupt nicht vorhergesehen habe, war die Idee von Gustavus Simmons, der zu der Zeit an den Sandia National Laboratories arbeitete, einer militärischen Forschungseinrichtung. Gus entdeckte, dass die von uns entwickelte »public-key cryptography« ein entscheidendes Problem eines Kernwaffenteststoppvertrags (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty) lösen könnte, nämlich wie man die Einhaltung des Vertrags verifiziert. Die Vorstellung war damals: Wir vergraben Seismografen in der Nähe der sowjetischen Testgelände, die senden uns ständig Signale, und dadurch können wir eine kleine – unterirdische – Kernwaffenexplosion von einem Erdbeben unterscheiden, was auf größere Entfernung nicht möglich ist.

Alles auf Gegenseitigkeit natürlich. Die Sowjets hätten also auch in unserem Boden entsprechende Geräte vergraben. Nur wären dann die Kommunikationskanäle in der Hand des jeweiligen Gegners gewesen.

Das heißt, die Sowjets hätten die Signale der Seismografen unterdrücken, sie durch nachgemachte ersetzen und so unentdeckt ihre Bombe zünden können?
Genau. Um das zu verhindern, hätten unsere Geräte die Kommunikation der Sowjets verschlüsseln müssen. Aber sie hatten damals ungeheure Angst vor Spionage. Was, wenn unser Gerät einen Funkempfänger oder ein Radargerät enthielte und die so erlangten Informationen unter der Verschlüsselung unerkannt nach Hause schicken würde?

An dieser Stelle hatte Gus Simmons die Idee, das Verfahren umzudrehen. Der Seismograf verschlüsselt nicht wie üblich mit dem öffentlichen Schlüssel, so dass nur der legitime Empfänger die Nachricht lesen kann, sondern mit dem geheimen. Daher hätten die Sowjets die Meldungen unserer Seismografen mitlesen können, wären jedoch nicht in der Lage gewesen, sie zu faken.

Das ist das Problem der Authentifizierung?
Ja. Es läuft auf dasselbe hinaus, ob man erst den öffentlichen Schlüssel anwendet und dann den geheimen oder umgekehrt. Wer Vertraulichkeit will, lässt mit dem öffentlichen Schlüssel verschlüsseln und entschlüsselt mit dem geheimen. Wer sichergehen will, dass die Meldung aus der richtigen Quelle kommt, macht es umgekehrt. Mit etwas mehr Aufwand kann man beides zugleich haben. Also hat »public-key cryptography« eine Lösung des Verifizierungsproblems bereitgestellt.

SERIE
Große Forscher im Gespräch




BERNHARD KREUTZER FÜR HEIDELBERG LAUREATE FORUM FOUNDATION (HLFF)

Martin Edward Hellman (* 2.10. 1945)

seit 1971 bis zu seiner Emeritierung 1996 Professor an der Stanford University, ist in erster Linie bekannt, weil er in den 1970er Jahren gemeinsam mit Whitfield Diffie und Ralph Merkle die Kryptografie mit veröffentlichtem Schlüssel (»public-key cryptography«) erfand. Das Prinzip liegt heute allen verschlüsselten Nachrichtenübermittlungen, vor allem über das Internet, zu Grunde. Für ihre Leistungen wurden Diffie und Hellman 2015 mit dem ACM A.M. Turing Award ausgezeichnet.

Das Problem war nur, dass Ronald Reagan, der 1981 Präsident wurde, den Vertrag nicht wollte. Im Rückblick wird klar, dass das amerikanische Militär das Vorhaben schon unter Jimmy Carter torpediert hat. Wir haben den Kernwaffenteststoppvertrag ja bis heute nicht ratifiziert.

Die Militärs haben ihren Widerstand dagegen nicht offen zugegeben, sondern hinter Forderungen wie der nach »Nachprüfung durch Eindringen« (intrusive verification) versteckt. Sie wussten genau, dass die Sowjets sich niemals darauf einlassen würden, uns Zugang zu ihren Forschungsstätten zu geben.

Also hat die »public-key cryptography« damals im Endeffekt nicht geholfen?

Nein. Aber sie hätte können, und sie kann es auch heute noch. Wenn wir uns dazu durchringen könnten, den Teststoppvertrag wiederzubeleben – was zweifellos im Interesse der Welt wäre und damit auch in unserem –, dann stünde die Technik bereit. Doch das wird unter Trump und unter der republikanischen Partei in ihrem gegenwärtigen Zustand nicht passieren.

Was sonst hat sich in den letzten 40 Jahren getan?

Was das Internet angeht, ist das Problem der Sicherheit unerwartet in den Vordergrund gerückt. Heute kann ein Cyberangriff auf das Stromnetz oder den Luftverkehr einer Nation großen Schaden zufügen. Ein erheblicher Anteil der Bevölkerung würde dabei ums Leben kommen. Wenn zum Beispiel die großen Hochspannungstransformatoren zerstört würden, würde es Monate dauern, bis das Stromnetz wieder funktioniert, mit gravierenden Folgen für die Lebensmittelversorgung. Ein solcher Anschlag würde unweigerlich den Ruf nach Vergeltung auslösen und so eine Eskalationsspirale in Gang setzen.

Im Frühjahr 2007 gab es einen Angriff, der die Computersysteme Estlands lahmlegte und so unbeherrschbar war, dass das ganze Land sich vom Internet abkoppeln musste. Menschen kamen nicht zu Schaden; aber einige Leute in

Estland sind zu der Überzeugung gekommen, dass der Bündnisfall nach Artikel 5 des NATO-Vertrags vorliege, das heißt, dass alle NATO-Staaten Estland militärisch zu Hilfe eilen müssten.

Inwiefern steht Ihre Arbeit in Konkurrenz zu dem Verschlüsselungssystem von Rivest, Shamir und Adleman (RSA)?

Nicht mehr. Das ist eine wechselvolle Geschichte. Anfangs haben wir gut zusammengearbeitet. Whitfield Diffie und ich haben bei den Kollegen am MIT vorgetragen und Ideen ausgetauscht. Ron Rivest und seine Kollegen haben uns – Diffie und mir – in ihrer bahnbrechenden Arbeit ausdrücklich bestätigt, dass wir die »public-key cryptography« erfunden haben.

Das änderte sich, als Geld ins Spiel kam. Das MIT hatte ihre Arbeiten patentieren lassen, Stanford unsere, und als die Firma RSA begann, mit ihrem Verfahren richtig Geld zu verdienen, sagten wir: Unsere Patente sind älter, zahlt bitte Lizenzgebühren. Woraufhin die entgegneten: Eure Patente sind ungültig, verklagt uns doch, wenn ihr wollt.

Das war mit ziemlicher Sicherheit ein Bluff. Wenn Stanford dagegen angegangen wäre, hätten die wahrscheinlich klein beigegeben, denn Patentstreitigkeiten sind extrem teuer. Nur war das auch unser Problem. Für unsere Patente war bis dahin nicht viel Geld geflossen. Der externe Anwalt, den wir damals hinzugezogen hatten, sagte uns, wir sollten ein Budget von einer Viertelmillion Dollar bereitstellen oder lieber gleich die Finger davonlassen. Heute wären das ungefähr zwei Millionen. Das Risiko mochten die maßgeblichen Leute in Stanford nicht eingehen.

Also kam der erste feindliche Akt von RSA?

Ja und nein. Doch das war nicht von Anfang an klar. Ich musste zuerst aus meinen ehelichen Konflikten lernen.

Wie bitte?

Meine Frau und ich waren damals beide wütend aufeinander, weil jeder von uns der Überzeugung war, der jeweils andere würde ständig Streit anfangen. Es ist uns in einem langen Prozess gelungen, diese Blockade zu überwinden. Um unsere Ehe steht es jetzt weit besser, weil wir gelernt haben, den Standpunkt des jeweils anderen einzunehmen.

So bin ich auch in dem Konflikt mit den Kollegen verfahren. Konnte RSA zu dem Schluss kommen, die ganze Auseinandersetzung sei von mir verschuldet? Die Antwort war

Geheimhaltung durch Veröffentlichung

Das klassische Mittel zur Wahrung der Vertraulichkeit ist die symmetrische Chiffre. Der Absender wendet auf den Text, den er mit dem Empfänger teilen will, eine Berechnungsvorschrift (im Mathematikerjargon: eine Abbildung) an. Diese verwandelt den Klartext in vollkommen unverständliches Kauderwelsch. In dieser Form kann er gefahrlos über einen abhörbaren Kanal – Funkverbindung, Telefonleitung, Internet – geschickt werden. Der Empfänger wendet auf diesen Chiffretext die Umkehrabbildung an und gewinnt so den Klartext zurück.

Damit das funktioniert, müssen Absender und Empfänger sich vorab auf einen »Schlüssel« geeinigt haben, das heißt eine Zeichenfolge, die sowohl die Abbildung als auch die Umkehrabbildung bestimmt; daher der Name »symmetrische Chiffre«. Das ist schwierig bis unmöglich, wenn die beiden überhaupt kein sicheres Kommunikationsmittel zur Verfügung haben oder, wie im Onlinehandel, sich noch nicht kennen.

Einen Ausweg bieten die asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren. Der Empfänger gibt den Teil des Schlüssels, der die Abbildung definiert, öffentlich bekannt, behält jedoch den anderen Teil für die Umkehrabbildung für sich. Dieses Verfahren heißt Kryptografie mit veröffentlichtem Schlüssel oder »public-key cryptography« auf Englisch. So kann ihm jedermann Geheimnachrichten schicken, die nur er selbst entschlüsseln kann.

Allerdings ist zu jeder Abbildung die Umkehrabbildung (falls sie überhaupt existiert) eindeutig bestimmt; demnach ist der geheime Schlüsselteil aus dem öffentlichen errechenbar, was das ganze Verfahren wertlos machen würde. Doch die asymmetrischen Verfahren sind so gebaut, dass diese – prinzipiell mögliche – Berechnung ungeheuer aufwändig ist: Die besten Computer könnten sie in Jahrmillionen nicht durchführen.

Gute Kandidaten für die Entwicklung einer asymmetrischen Chiffre sind daher Probleme, deren Lösung zwar existiert und eindeutig bestimmt ist, aber zu ihrer Berechnung einen mit der Problemgröße exponentiell ansteigenden Aufwand erfordert. In seinem **Spektrum**-Artikel (Oktober 1979, S. 92) hat Hellman dafür das Untersummen-Problem (knapsack problem) gewählt: Finde aus einer großen Menge natürlicher Zahlen diejenigen, die zusammenaddiert eine vorgegebene Summe ergeben. Da sich dieses Problem später als weniger geeignet erwies, setzten Diffie, Hellman und Merkle an seine Stelle das Problem des diskreten Logarithmus: Finde c in der Gleichung $a^c = b$, wenn a und b bekannt und alle drei Zahlen aus dem Körper der natürlichen Zahlen modulo einer sehr großen Primzahl sind (siehe **Spektrum** Mai 1995, S. 46).

Das RSA-Verfahren von Ron Rivest, Adi Shamir und Leonard Adleman dagegen arbeitet mit dem Faktorisierungsproblem: Finde die beiden (sehr großen) Primfaktoren einer zusammengesetzten natürlichen Zahl.

Ja. Selbstverständlich war nicht ich allein schuld, aber die anderen ebenso wenig. Nachdem wir zwischendurch überhaupt nicht gut aufeinander zu sprechen waren, sind wir am Ende sogar richtig gute Freunde geworden – und es ist besser und gesünder, Freunde zu haben als Feinde.

Haben Sie auf dieselbe Weise den Konflikt mit der NSA gelöst?

Nicht bloß ich. In diesem Fall ging die Initiative von deren damaligem Chef aus, Admiral Bobby Ray Inman.

Es fing überhaupt nicht freundschaftlich an. Die NSA sah in unseren Forschungen und vor allem in deren Veröffentlichung eine schwere Beschädigung ihres Geschäfts – nicht zu Unrecht, denn diese Technik würde ihre Möglichkeiten, geheime Nachrichten mitzuhören, erheblich beschneiden. Daher bedrohte sie mich auf den verschiedensten Kanälen – nicht öffentlich natürlich. Nicht umsonst wird NSA häufig als »never say anything« gedeutet.

Das erzürnte mich gewaltig und löste den Entschluss aus, die Sache jetzt erst recht durchzuziehen. Inzwischen weiß ich, dass zwar der Entschluss wahrscheinlich richtig war, jedoch nicht die Begründung. Es geht nicht darum, der Stärkere zu sein, sondern das Richtige zu tun.

Irgendwann 1978, auf dem Höhepunkt der Auseinandersetzung, kam ein Anruf von der NSA. Der Direktor, Admiral Bobby Inman, würde gern mit mir sprechen; ob ich dazu bereit sei. Ich sagte zu; wir hatten uns noch nie gesehen, sondern nur unfreundliche Briefe ausgetauscht. Wenig später kommt Inman in mein Büro und sagt »Gut zu sehen, dass Sie gar keine Hörner haben«. Ich antworte »Gleichfalls«. Natürlich hatten wir beide den jeweiligen Gegner verteufelt.

Als Zweites erzählte Inman mir, dass er mit seinem Besuch gegen den ausdrücklichen Rat der gesamten Chefetage der NSA handelte. Klar: Wenn man mit dem Teufel spricht, kann man sich eigentlich nur die Finger verbrennen. Aber, so Inman, »ich sehe nicht, dass miteinander zu reden schadet«. Recht hat er. Wir waren zunächst sehr vorsichtig, doch allmählich baute sich Vertrauen auf. Inzwischen sind wir gute Freunde.

Vor etwa zehn Jahren habe ich dann Risikostudien zur Gefahr eines Atomkriegs durchgeführt und bin zu dem Ergebnis gekommen, dass dieses Risiko im allgemeinen Bewusstsein weit unterschätzt wird. Das habe ich in einer Denkschrift zusammengefasst – und Inman zählte, zusammen mit anderen Prominenten, zu den Unterzeichnern. Das hätte er nicht getan, selbst wenn er dem Inhalt zustimmt, wenn er nicht Vertrauen zu mir gefasst hätte. Wer würde schon einem Gegner durch einen solchen Akt zu größerer Bedeutung verhelfen?

Die Risikostudie habe ich inzwischen übrigens weitergeführt und bin zu dem Ergebnis gekommen, dass wir die nationale Sicherheit völlig neu überdenken müssen. Die Grundannahmen der nuklearen Abschreckung sind zu überprüfen. Ich habe ein neues Konzept erarbeitet, das noch in diesem Jahr vorgestellt werden soll.

Glauben Sie, dass die NSA als Organisation, nicht nur ihr damaliger Chef, ihre Position zur »public-key cryptography« geändert hat?

Ja. Natürlich horchen sie nach wie vor jedermann ab, Feind wie Freund, auch Angela Merkel. Doch Ende 2014 erschien ein Artikel im »Stanford Alumni Magazine«, in dem Inman gefragt wurde, ob er mit dem Wissen von heute die »public-key cryptography« immer noch unterdrücken würde, wenn er könnte. Inman, damals schon im Ruhestand, aber weiterhin eine anerkannte Figur in der Geheimdienstszene, antwortete: »Ganz im Gegenteil! Nachdem die Chinesen Geschäftsgeheimnisse mit Relevanz für die nationale Sicherheit gestohlen haben, würde ich darauf dringen, die Algorithmen für das Verfahren so rasch wie möglich auszuliefern.«

Zwischendurch drohte Ihnen das Gefängnis, oder?

Das weiß man nicht so genau. Manche Leute meinten eher, meine Frau sei in Gefahr gewesen. Ich hatte ja nicht nur unseren eigenen Spionen ins Handwerk gepfuscht, sondern auch deren Kollegen in der Sowjetunion und überall sonst auf der Welt.

Um 1977 erhielt die Berufsvereinigung IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), in deren Zeitschrift wir unsere Arbeit eingereicht hatten, einen Brief von einem Mitglied namens Joseph A. Meyer aus Maryland; dort sitzt unter anderem die NSA. Meyer gab der Befürchtung Ausdruck, die Veröffentlichung gewisser Arbeiten – gemeint waren unsere – sei juristisch gleichbedeutend mit dem Export sensibler Technologien und daher mit fünf bis zehn Jahren Gefängnis zu ahnden; die entsprechenden Vorschriften (International Traffic and Arms Regulations) legte er in Kopie gleich bei. Ich ging zur Rechtsabteilung der Stanford University und fragte, ob sie mir juristisch beistehen würden. Der Zuständige sagte mir zu: »Wir werden Sie verteidigen. Und wenn Sie verurteilt werden, werden wir in Berufung gehen. Aber ich muss Sie warnen: Für Sie ins Gefängnis gehen können wir nicht.« ◂

Die Fragen stellte der promovierte Mathematiker und ehemalige **Spektrum**-Redakteur **Christoph Pöppe**.

LITERATURTIPPS

Beth, T.: Sichere offene Netze. Spektrum der Wissenschaft Mai 1995, S. 46–55
Über das Problem der Vertraulichkeit und der Authentifizierung über unsichere Kanäle

Corrigan-Gibbs, H.: Keeping Secrets. In: Stanford Alumni Magazine, November/Dezember 2014, S. 58–64
Über die frühe Auseinandersetzung zwischen Merkle, Diffie und Hellman einerseits und der NSA andererseits sowie Admiral Inmans revidierte Haltung

Hellmann, M. (damals falsch geschrieben): Die Mathematik neuer Verschlüsselungssysteme. Spektrum der Wissenschaft Oktober 1979, S. 92–101
Hellman erklärt in dem populärwissenschaftlichen Artikel die mathematischen Grundlagen des Untersummen-Problems.

Hellman, D., Hellman, M.: A New Map for Relationships. Creating True Love at Home & Peace on the Planet. New Map Publishing 2016. Kostenfreier Download unter https://www.anewmap.com/
Martin Hellman und seine Frau Dorothie beschreiben, wie sie ihre Eheprobleme überwinden konnten.



FREISTETTERS FORMELWELT
GENAU TROTZ UNGENAU

Die Mathematik ist eine exakte Wissenschaft – selbst wenn Berechnungen absichtlich ungenau sind. Verloren geht dabei nichts, denn das Ausmaß der Ungenauigkeit lässt sich quantifizieren.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

▸▸ spektrum.de/artikel/1621178

Während meiner Zeit als Forscher habe ich mich mit der mathematischen Astronomie beschäftigt. Und wie immer, wenn abstrakte Mathematik auf die reale Welt trifft, war es nicht ganz einfach: Ich musste Abstriche machen. Denn die gravitative Wechselwirkung von mehr als zwei Objekten lässt sich nicht exakt berechnen. Wenn man trotzdem über die Bewegungen von Planeten und Asteroiden im Sonnensystem Bescheid wissen will, muss man sich mit Näherungen begnügen. Glücklicherweise lässt sich der Unterschied zwischen Theorie und Wirklichkeit mathematisch ausdrücken:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \mathcal{O}(x^3)$$

Die Formel zeigt die Exponentialfunktion, die als unendliche Summe dargestellt werden kann. In der Realität ist es natürlich nicht möglich, unendlich viele Additionen durchzuführen. Man muss die Berechnung nach einer bestimmten Zeit abbrechen. Mit dieser Taktik löst man Gleichungen zwar näherungsweise, macht allerdings zwangsläufig einen Fehler. Wie groß dieser ist, zeigt uns im obigen Beispiel der letzte Term der Formel.

Das »$\mathcal{O}$« ist ein so genanntes »Landau-Symbol«. Verwendet hat es erstmals der deutsche Mathematiker Paul Bachmann im Jahr 1894. Bekannt wurde es aber durch seinen Kollegen Edmund Landau, dessen Namen es erhielt. Das Symbol beschreibt, wie sich Funktionen und Folgen im Unendlichen verhalten. Im obigen Beispiel habe ich die Reihenentwicklung der Exponentialfunktion nach drei Termen abgebrochen. Statt der unendlichen Summe berechne ich bloß $e^x = 1 + x + x^2/2$ und ignoriere alle restlichen Ausdrücke, die noch folgen würden. Ich dürfte in dieser Formel also kein Gleichheitszeichen verwenden, denn die Exponentialfunktion ist mit Sicherheit nicht exakt gleich $1 + x + x^2/2$.

Man kann den Fehler, der durch die Näherung entsteht, aber abschätzen. In der Summe tauchen wachsende Potenzen von x auf, und wenn die Zahl x klein genug ist, liefern die Potenzen einen immer schwächeren Beitrag. Das heißt: Man kann sich sicher sein, dass der Fehler der Näherung nie größer wird als ein Ausdruck der Ordnung x^3. Genau das besagt das Landau-Symbol. Wenn man es in die Formel aufnimmt, wird die Gleichung korrekt.

Zu wissen, wie sich eine Folge oder Funktion im Unendlichen verhält, auch wenn man es nicht konkret ausrechnen kann, ist vor allem in der Informatik wichtig. Während meiner Doktorarbeit habe ich viele Computerprogramme geschrieben, welche die gravitative Anziehung zwischen Himmelskörpern berechnen. Bei nur drei Objekten gibt es insgesamt sechs Wechselwirkungen. Bei vier Himmelskörpern steigt die Zahl auf zwölf. Allgemein muss man für n Himmelskörper $n^2 - n$ gravitative Wechselwirkungen berücksichtigen (den Einfluss eines Objekts auf sich selbst kann man ignorieren, deswegen zieht man von n^2 den Wert n ab).

Somit steigt die Zahl der Rechenoperationen für n Himmelskörper mit $\mathcal{O}(n^2)$ an. Das ist kein Problem, solange n klein ist. Wenn man es allerdings mit vielen Objekten zu tun hat (zum Beispiel den Milliarden Sternen einer Galaxie), wächst der rechnerische Aufwand rasant an. Doch mit kreativen Tricks lässt sich die Zahl der Berechnungen oftmals reduzieren. Der Algorithmus, den ich für meinen speziellen Fall entwickelt habe, verhält sich nicht mehr wie $\mathcal{O}(n^2)$, sondern wie $\mathcal{O}(\log n)$. Auf den ersten Blick wirkt dieses Ergebnis unspektakulär, doch in der Praxis erweist es sich als wichtiger Erfolg!

▸▸ Auf den folgenden Seiten finden Sie eine Sonderpublikation der Gesellschaft Deutscher Chemiker



ELEMENTE

150 JAHRE PERIODENSYSTEM

Ein Magazin der Gesellschaft Deutscher Chemiker

Astrochemie

Geburt der Atome im Weltall

Organismen

Die Bausteine des Lebens

Rohstoffe

Seltene Metalle in Smartphones

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

Das Periodensystem ist ein Ordnungssystem, in dem die heute bekannten 118 Elemente in einer chemisch-physikalisch sinnvollen Struktur angeordnet sind. Das Faszinierende an diesem System ist, dass die Natur selbst sich diese Ordnung gegeben hat. Das Periodensystem wurde nicht vom Menschen entwickelt, sondern entdeckt und zwar vor 150 Jahren, im Jahr 1869. Aus Anlass dieses Jubiläums haben die Generalversammlung der Vereinten Nationen und die UNESCO das Jahr 2019 zum Internationalen Jahr des Periodensystems ausgerufen.

Zugegeben, das Periodensystem sieht zunächst einmal kompliziert aus. Und viele Menschen erinnert es an den Chemieunterricht, den sie in der Schule oft als schwierig empfunden haben. Aber in dieser Beilage wollen wir nicht Ihr Schulwissen auffrischen, sondern Ihnen ganz ohne Formeln Neues, Wissenswertes, Skurriles und Faszinierendes rund um das Periodensystem vermitteln.

Fast zeitgleich und unabhängig voneinander haben der Russe Dmitri Mendelejew und der Deutsche Lothar Meyer in den 1860er Jahren die periodische Anordnung der Elemente erkannt und 1869 in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht. Damals waren noch längst nicht alle Elemente entdeckt und auf Grund von »Lücken« im damaligen Periodensystem konnte die Existenz weiterer, noch nicht bekannter Elemente vorhergesagt werden. Es war eine großartige Bestätigung des Periodensystems, dass die postulierten Elemente später tatsächlich entdeckt wurden und ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften den Vorhersagen verblüffend genau entsprachen. Einen Beitrag über die Entdeckung des Periodensystems und den Disput der beiden Chemiker, wer diese Ordnung denn nun als Erster erkannt hat, finden Sie ab Seite 6.

In einem der anderen Beiträge werden Sie erfahren, wie viele der heute bekannten Elemente die meisten von uns täglich nutzen, weil sie in modernen Smartphones verarbeitet sind. Wir werfen aber auch einen kritischen Blick darauf, wie diese Elemente gewonnen werden, und erläutern, warum das Recycling von Smartphones so schwierig ist.

Die Beiträge können Sie in beliebiger Reihenfolge und ohne chemische Fachkenntnisse lesen. Und wenn Sie neugierig geworden sind und mehr über das Periodensystem erfahren möchten, dann schauen Sie auf den Webseiten der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) vorbei.

Unter www.gdch.de/periodensystem finden Sie viele weitere Informationen zu den einzelnen Elementen.

Wir wünschen Ihnen viel Freude bei der Lektüre.



Dr. Matthias Urmann
Präsident
der GDCh



Prof. Dr. Wolfram Koch
Geschäftsführer
der GDCh

Umschlagbild
1869 entwickelten die Chemiker Dmitri Mendelejew und Lothar Meyer unabhängig voneinander eine Systematik der Elemente. Das Periodensystem half, zahlreiche unentdeckte Elemente vorherzusagen, etwa Scandium (Sc). Vor 150 Jahren kannte man 63 Elemente, heute umfasst das Periodensystem 118.

Getty Images / Science Photo Library / David Mack

Namensgeschichten

Bei der Namenssuche ließen sich die Entdecker der Elemente vielfältig inspirieren: von Mythen, Himmelskörpern, Fundorten, Farben und Gerüchen. Eine Auswahl:




Brom und Osmium

Das Halogen Brom und das Übergangsmetall Osmium verdanken ihre Namen ihrem penetranten Geruch – sowohl das altgriechische »bromos« als auch »osme« lassen sich mit »Gestank« übersetzen. Bromdämpfe riechen stechend, Osmiumtetroxid, das sich an der Oberfläche von Osmiumpulver bildet, nach Rettich und Ozon.



Americium, Californium, Darmstadtium, Europium, Indium, Rhenium, Ytterbium

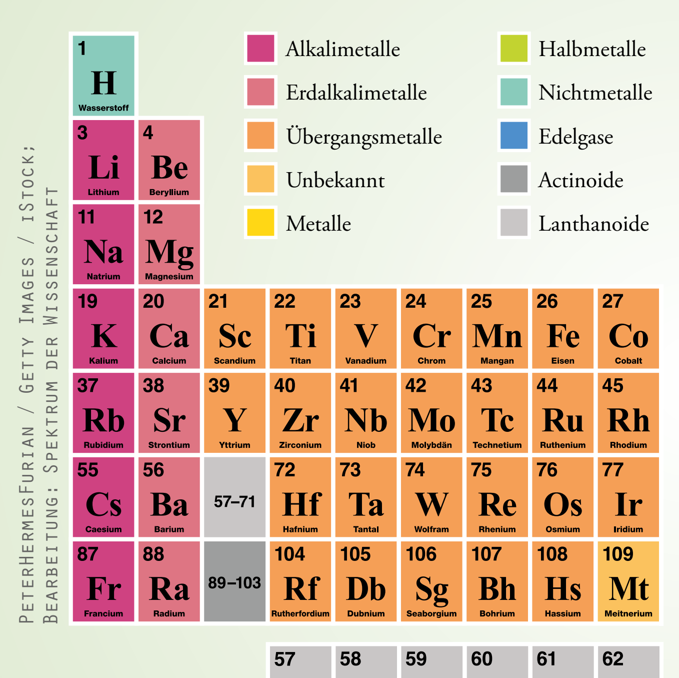
Rund 30 Elemente tragen einen Ort im Namen. Meist verweisen sie auf Städte, Regionen oder Länder. Americium und Europium sind nach Erdteilen benannt und Rhenium nach dem Fluss Rhein. Der schwedische Ort Ytterby war gleich viermal Namensgeber: für die seltenen Erden Erbium, Terbium, Ytterbium und Yttrium.

Icons: MPS Limited für Spektrum der Wissenschaft

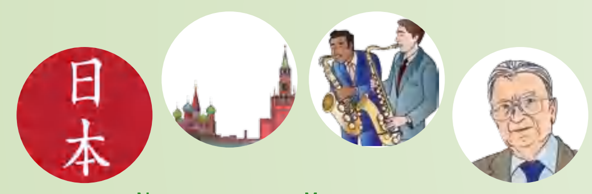


Wolfram

Schon im 16. Jahrhundert soll der Mineraloge Georgius Agricola Wolframit als »lupi suma« bezeichnet haben. Übersetzt aus dem Lateinischen bedeutet das so viel wie »Wolf-Schaum« oder »Wolf-Rahm«. Die Verbindung war häufig Zinnerzen beigemischt und verschlackte das Zinn beim Schmelzen, fraß es also auf wie ein Wolf.



PeterHermesFurian / Getty Images / iStock; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft



Nihonium, Moscovium, Tenness und Oganesson

Die Namen der vier jüngsten Mitglieder im Periodensystem der Elemente wurden von den jeweiligen Entdeckern vorgeschlagen und im November 2016 festgelegt. Hätten die Fans der Heavy-Metal-Band Motörhead entscheiden dürfen, würde Moscovium heute Lemmium heißen. Über 150 000 Fans unterschrieben eine Petition zur Benennung des Elements nach dem verstorbenen Frontsänger der Band, Lemmy Kilmister.



Selen und Tellur

Als der Chemiker Jakob Berzelius Anfang des 19. Jahrhunderts das Element Selen taufte, wollte er auf die Ähnlichkeit zu Tellur verweisen, das nach dem lateinischen »tellus« (Erde) benannt worden war. Er wählte daher das griechische »selene«: Mond.



Niob

Niob ist Tantal sehr ähnlich, weswegen Heinrich Rose das Element 1844 nach Niobe benannte, der Tochter des Tantalos. Was er nicht wusste: Charles Hatchett hatte das Element schon 1801 entdeckt und Columbium getauft, zu Ehren Amerikas – seinerzeit auch bekannt als Columbia. Die IUPAC entschied sich 1950 trotzdem für den Namen Niob.

Icons: MPS Limited für Spektrum der Wissenschaft



Arsen, Cäsium, Chrom, Iod, Iridium

14 Namen verraten die Farbe des Elements oder seiner Verbindungen: Cäsium etwa, von lateinisch »ceasius«, steht für himmelblau und verweist auf die Flammenfärbung des Elements, Iod kommt von griechisch »ioeides« für violett und Arsen von altpersisch »al-zarnik« für goldfarben. Chrom, von griechisch »chroma« (Farbe), und Iridium, von lateinisch »iris« (Regenbogen), sind die Chamäleons unter den Elementen.



Phosphor

Eigentlich suchte der Apotheker und Alchemist Hennig Brand nach dem »Stein der Weisen«, als er 1669 Urin destillierte. Statt eines Steins, der unedle Metalle in Gold verwandeln kann, erzeugte er eine im Dunkeln leuchtende Masse: weißen Phosphor. Der Name ist dem griechischen »phosphoros« (Lichtträger) entlehnt.



Kobalt und Nickel

Kobalt und Nickel hießen bereits so, bevor man die Elemente entdeckt hatte. Im Mittelalter verwechselten Bergarbeiter kostbare Silber- und Kupfererze mit Kobalt- oder Nickelerzen, die sich nicht verarbeiten ließen. Sie glaubten daher, dass Kobolde und der Berggeist Nickel das Silber und Kupfer verhext oder aufgefressen hätten.



Helium

Helium wurde als einziges Element zuerst im All entdeckt. 1868 bemerkte der französische Astronom Jules Janssen im Spektrum des Sonnenlichts die gelbe Spektrallinie des Edelgases. Der Name erinnert an den Fundort: Das griechische Wort »hélios« bedeutet Sonne.

								2 He Helium
			5 B Bor	6 C Kohlenstoff	7 N Stickstoff	8 O Sauerstoff	9 F Fluor	10 Ne Neon
			13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphor	16 S Schwefel	17 Cl Chlor	18 Ar Argon
28 Ni Nickel	29 Cu Kupfer	30 Zn Zink	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsen	34 Se Selen	35 Br Brom	36 Kr Krypton
46 Pd Palladium	47 Ag Silber	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Zinn	51 Sb Antimon	52 Te Tellur	53 I Iod	54 Xe Xenon
78 Pt Platin	79 Au Gold	80 Hg Quecksilber	81 Tl Thallium	82 Pb Blei	83 Bi Bismut	84 Po Polonium	85 At Astat	86 Rn Radon
110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tenness	118 Og Oganesson
63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

PeterHermesFurian / Getty Images / iStock; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft





Uran, Neptunium, Plutonium

Die radioaktiven Schwermetalle sind nach den Planeten Uran, Neptun und dem Zwergplaneten Pluto benannt, bei deren Namensgebung wiederum die Götter der griechischen und römischen Mythologie Pate standen. Wegen der Zerstörungskraft der Plutoniumbombe entschieden sich die Entdecker des gleichnamigen Elements für Pluton, den Herrscher der Totenwelt.



Platin

Die Goldgräber in den spanischen Kolonien im 17. Jahrhundert glaubten, Platin sei wertlos, und warfen es daher in die Flüsse zurück oder verstreuten es auf der Erde. Wegen der Farbähnlichkeit wählten sie als Name die abfällige Verniedlichung des spanischen »plata« (Silber.)



Tantal

Anders Gustaf Ekeberg benannte Tantal nach dem König Tantalos. Der griechischen Mythologie zufolge wurde dieser von den Göttern verstoßen und litt in der Unterwelt große Qualen. Ekeberg wählte den Namen, da Tantal(V)-Oxid mit Säuren kein Salz bildet, also schmachten müsse und wie Tantalos seinen Durst nicht löschen könne.




Wasserstoff und Sauerstoff

Antoine de Lavoisier bezeichnete Sauerstoff 1777 als Oxygen. Der Name leitet sich ab vom griechischen »oxys« für »sauer« und »gen« für »ich stelle her«. Der Chemiker hatte irrtümlich angenommen, dass Sauerstoff und nicht Wasserstoff Säuren kennzeichnet. Korrekt beobachtete er die Bildung von Wasser beim Verbrennen von Wasserstoff. Er taufte das Element 1783 »Hydrogen«, was so viel wie »Wasser bildender Stoff« heißt.



Promethium

Der Name des 1945 entdeckten Promethiums soll uns eine Warnung sein: Er ist an den Titanen Prometheus angelehnt. Der griechischen Mythologie nach brachte er den Menschen das Feuer. Die Forscher wollten darauf hinweisen, dass radioaktive Elemente in Menschenhand sehr gefährlich sein können.



Die Entdeckung des Periodensystems

Vor 150 Jahren entwickelte Dmitri Mendelejew eine Systematik der chemischen Elemente und gilt heute als der »Vater des Periodensystems«, obwohl seinerzeit auch andere Forscher eine Ordnung der Elemente erkannten.

Es war ein Spiel mit 63 Karten, und der russische Chemiker kannte die Spielregeln nicht. Er musste darin sieben Farben und zwölf Joker finden. Vielleicht waren es auch 17 Farben oder 19, und möglicherweise gab es 35 Joker, die wiederum in zwei Kategorien fielen. Zu allem Überfluss fehlten mindestens vier Karten, und zwei Paare enthielten vermutlich vertauschte Angaben.

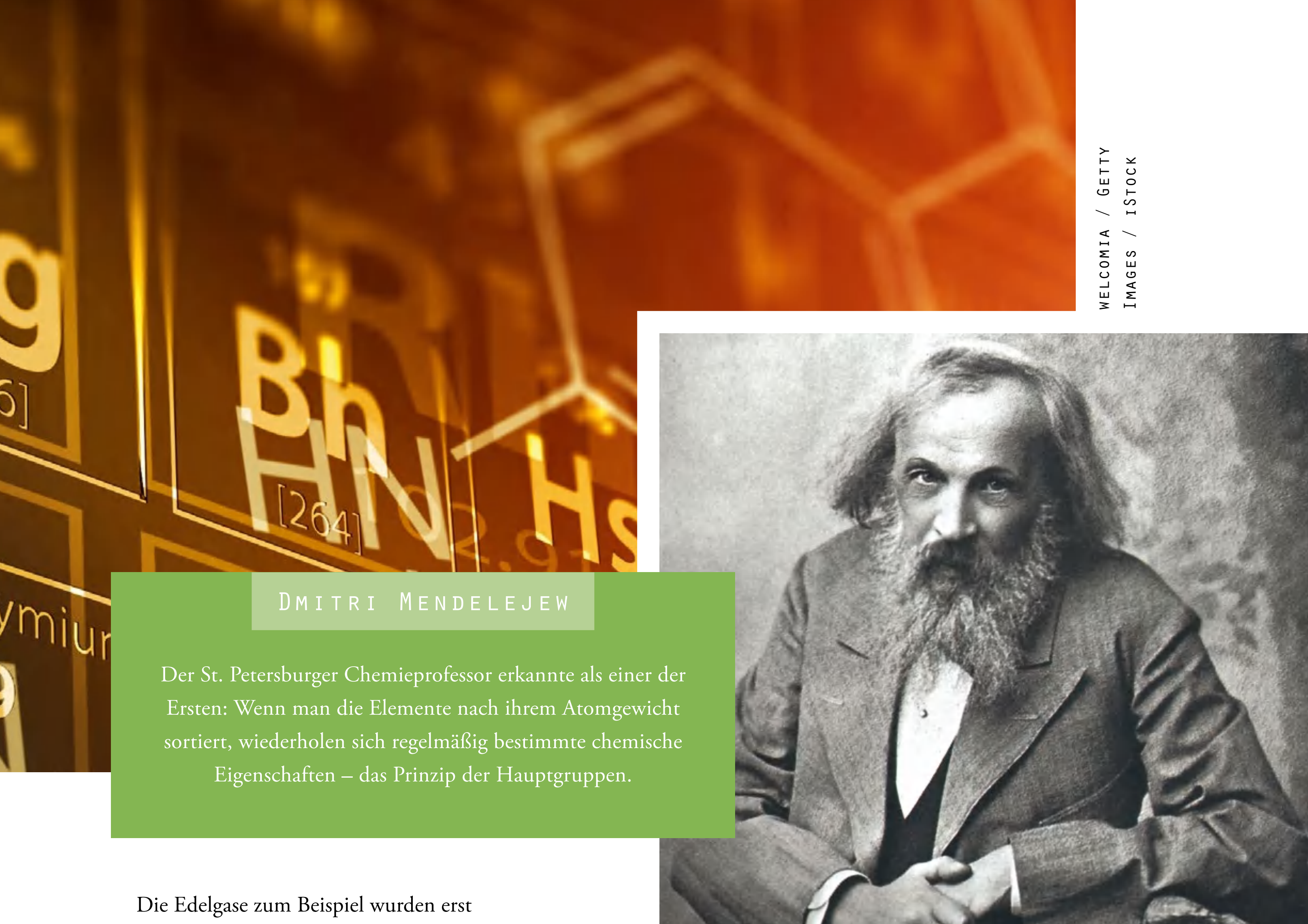
Der St. Petersburger Chemieprofessor Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834–1907) hatte sich vor 150 Jahren, im Februar 1869, eine knifflige Aufgabe vorgenommen: Für sein neues Lehrbuch wollte er eine möglichst logische Abfolge der Kapitel finden und die seinerzeit 63 bekannten chemischen Elemente ordnen. Darum spielte er mit ihnen: Er hatte die Elemente auf Karten geschrieben, die er wie beim Kartenspiel Solitaire vor sich auslegte, und suchte nach einem Muster, so einige seiner Biografen. Andere zitieren aus dem Tagebuch Mendelejews, dass er einen Teil der Lösung erträumte und nach dem Aufwachen sofort notierte. Ob diese Anekdoten stimmen oder nicht, dem Chemiker fiel eine Periodizität auf: Wenn er die Elemente nach dem Atomgewicht sortierte, wiederholten sich stets bestimmte chemische Eigenschaften.

Es gab eine feste Abfolge von Familien, deren Mitglieder jeweils ähnliche Salze oder Säuren bildeten. Erst kamen die Alkalimetalle wie Lithium, Natrium und Kalium, später die Kohlenstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffgruppe und schließlich die Halogene mit Fluor, Chlor und Iod. Von einer Familie zur nächsten stieg die so genannte Wertigkeit, die Anzahl möglicher Bindungen eines Elements, zunächst an und nahm dann wieder ab.

Den ersten Entwurf einer Systematik, die dem heutigen Periodensystem ähnelte, skizzierte Mendelejew am 17. Februar 1869 (dem 1. März nach julianischem Kalender). Die Tabelle mit 19 Zeilen und sechs Spalten erschien in Deutschland im Frühjahr 1869 in der »Zeitschrift für Chemie«. Von oben nach unten hatte der Russe die Elemente in der Reihenfolge ihres Atomgewichts, heute sprechen wir von Atommassen, angeordnet. Die zweite Spalte etwa lautete: »Be, B, C, N, O, F, Na« – die Elemente von Beryllium bis Natrium, heute praktisch die zweite Periode des Periodensystems. Zudem waren sieben der später Hauptgruppen genannten Familien von Elementen schon zu erkennen. Jede hatte im Zentrum der Tabelle eine eigene Zeile.

118 Mitglieder

Diese Ordnung der chemischen Grundbausteine haben Wissenschaftler bis heute beträchtlich erweitert; das Periodensystem enthält inzwischen 118 Elemente, 90 natürlich vorkommende sowie 28 künstlich erzeugte – und ist doch noch immer zu erkennen. »Mendelejews Tafel war beständig genug, um sich der Kernladungszahl, den Isotopen, Edelgasen, seltenen Erden, Actiniden und der Quantenmechanik anzupassen«, schreiben die Autoren um Marco Fontani von der Universität Florenz in dem Buch »The Lost Elements«.



Welcomia / Getty Images / iStock

AKG Images / Blanc Kunstverlag

Dmitri Mendelejew

Der St. Petersburger Chemieprofessor erkannte als einer der Ersten: Wenn man die Elemente nach ihrem Atomgewicht sortiert, wiederholen sich regelmäßig bestimmte chemische Eigenschaften – das Prinzip der Hauptgruppen.

Die Edelgase zum Beispiel wurden erst in den 1890er Jahren entdeckt. Den Zusammenhang zwischen dem Aufbau eines Atoms und der Position der Elemente im Periodensystem enthüllte die Quantenphysik ab 1911.

Womöglich besaßen Mendelejew und seine Zeitgenossen gerade die richtige Dosis Wissen. Einerseits hatte zu Beginn der 1860er Jahre der Chemiker-Kongress in Karlsruhe die Bestimmung der Atomgewichte weitgehend vereinheitlicht. Ohne diese Basis wäre Mendelejews Arbeit aussichtslos gewesen. Andererseits war ihm die Komplexität der Aufgabe nicht bewusst.

Vermutlich hätte es Mendelejew zum Beispiel erhebliche Schwierigkeiten bereitet, wenn er schon alle so genannten seltenen Erden hätte einordnen müssen. Diese 17 Elemente unterscheiden sich nämlich kaum in ihren Atommassen. Auch in ihren Eigenschaften findet man viele Ähnlichkeiten. »1869 kennt Mendelejev erst fünf, die ihm bereits Kopfzerbrechen bereiten«, schreibt die Historikerin Bernadette Bensaude-Vincent von der Universität Sorbonne in Paris. Man könne »annehmen, dass die Periodentafel nur deshalb schon kurz nach dem Karlsruher Kongress konstruiert werden konnte, weil noch nicht alle seltenen Erden bekannt waren«.

Mendelejews Erfolg gründete auf jahrzehntelanger Vorarbeit vieler Kollegen. So berichtete 1816 Johann Wolfgang Döbereiner an der Universität Jena von Dreiergruppen chemisch ähnlicher Elemente wie den Erdalkalimetallen Calcium, Strontium und Barium. Diese wurden später Triaden genannt. Bei ihnen entsprach die Atommasse des mittleren Elements dem Mittelwert des leichtesten und des schwersten.

1864 erstellte der deutsche Chemiker Lothar Meyer (1830–1895) für sein Lehrbuch eine Tabelle, die 27 Elemente in sechs Spalten nach Atommasse und Wertigkeit kategorisierte. Heute wissen wir, dass das gerade sechs der acht Hauptgruppen waren. Es fehlten die Edelgase und die Borgruppe. Mit der Einordnung vieler Metalle hatte Meyer jedoch Schwierigkeiten und sortierte sie in weiteren Tabellen. Insgesamt konnte er so 50 Elemente unterbringen. Er führte die Differenzen der Atommassen explizit auf, sprach aber nicht von einer Periodizität, sondern von »Relationen für sechs als zusammengehörig wohl charakterisirte Gruppen von Elementen«. Und doch drückte sich »Periodizität durch die

Regelmäßigkeit der Atomgewichtsabstände aus«, schreibt der Münchner Historiker Ralph Cahn. Er hält es für »äußerst fragwürdig«, in dieser Tabelle noch kein Periodensystem zu sehen.

Wohin mit den Metallen?

Auch John Alexander Reina Newlands wurde erst sehr spät Ruhm zuteil, obwohl der Engländer bereits 1864 sein »Gesetz der Oktaven« formulierte. Er hatte festgestellt, dass die Eigenschaften der Elemente – zumindest bei den leichteren – wie die Töne der Tonleiter beim jeweils achten sehr ähnlich sind.

Die grundsätzliche Schwierigkeit bei dem Versuch, eine Ordnung zu finden, lag indes nicht bei den leichten, sondern bei den schwereren Elementen. Nach zwei Perioden mit je sieben Stoffen musste vom Alkalimetall Kalium zum Halogen Brom ein Bogen geschlagen werden, unter den 14 damals bekannte Stoffe passten. Neun davon waren die Metalle von Titan über Eisen bis zu Zink. Mendelejew erkannte, dass hier drei Elemente noch zu entdecken waren. 1871 veröffentlichte er einen fast 100 Seiten langen Aufsatz in den »Annalen der Chemie und Pharmacie«, in dem er von einer kleinen Periode mit sieben Elementen und einer großen mit 17 sprach. Wieso es gerade diese, nach Entdeckung der Edelgase um eins ergänzten Zahlen sind, konnte erst die Quantenphysik erklären.

Zwischen Dmitri Mendelejew und Lothar Meyer gab es in den Jahren ab 1870 mehrmals Auseinandersetzungen über die Priorität bei der Aufstellung des Periodensystems. Es ging dabei um viele Details, etwa die Frage, wo es Brüche und Verschiebungen in der Anordnung der Elemente nach aufsteigender Atommasse gab. Besonders plakativ war aber der Zwist um die Frage, wer zuerst von »Periodizität« gesprochen hatte.

Tatsächlich hatte Mendelejew früher als Lothar Meyer den Hinweis notiert, dass es eine periodische Abhängigkeit der Eigenschaften der Elemente von der Atommasse gebe. In seinem ersten zu dieser Frage in Deutschland publizierten Artikel von 1869 gab es jedoch einen Übersetzungsfehler: statt »periodisch« wie in der russischen Vorlage stand dort »stufenweise«.

Lothar Meyer hingegen brachte die Periodizität sehr deutlich in einem Beitrag zur Sprache, den er 1870 in den »Annalen der Chemie und Pharmacie« veröffentlichte. Er erweiterte das Konzept dort mit einer grafischen Darstellung der Atomvolumina, die ebenfalls periodisch mit der Atommasse steigen und wieder fallen. Dieser Aufsatz enthält zudem eine Tabelle der Elemente, in der Meyer auch schon eine Lösung für die Metalle von Titan bis Zink anbot. Er brachte sie in einer eigenen Spalte unter, versetzte sie aber gegenüber den Elementen der Hauptgruppen um eine Druckzeile nach unten, um einen noch nicht verstandenen Unterschied zu verdeutlichen.

Mendelejew erkannte 1869 wiederum als Erster, dass die Periode der leichtesten Elemente nicht wie in der ersten Fassung von Beryllium bis Natrium, sondern von Lithium bis Fluor reichte (Helium kannten die Chemiker noch nicht und Wasserstoff hatte bereits eine Sonderstellung). Die Quantenphysik zeigte später, dass es sich dabei nicht nur um eine kosmetische Veränderung handelte, sondern sich tatsächlich so verhält.

1869 und 1870 haben daher erst Mendelejew und dann Meyer das Wissen um die Ordnung der Elemente fundamental erweitert, der Deutsche konnte jedoch auf seine Tabelle aus dem Jahr von 1864 verweisen – das war die Voraussetzung

Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Von D. Mendelejeff. — Ordnet man Elemente nach zunehmenden Atomgewichten in verticale Reihen so, dass die Horizontalreihen analoge Elemente enthalten, wieder nach zunehmendem Atomgewicht geordnet, so erhält man folgende Zusammenstellung, aus der sich einige allgemeinere Folgerungen ableiten lassen.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
			Ni = Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	J = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

1. Die nach der Grösse des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen [...]fenweise Abänderung in den Eigenschaften.

[...]hemisch-analoge Elemente haben entweder übereinstimmende Atom[...] (Pt, Ir, Os), oder letztere nehmen gleichviel zu (K, Rb, Cs).

[...]as Anordnen nach den Atomgewichten entspricht der *Werthigkeit* [...]mente und bis zu einem gewissen Grade der Verschiedenheit im [...]chen Verhalten, z. B. Li, Be, B, C, N, O, F.

4. Die in der Natur verbreitetsten Elemente haben *kleine* Atomgewichte und alle solche Elemente zeichnen sich durch Schärfe des Verhaltens aus. Es sind also *typische* Elemente und mit Recht wird daher das leichteste Element H als typischer Massstab gewählt.

5. Die *Grösse* des Atomgewichtes bedingt die Eigenschaften des Elementes, weshalb beim Studium von Verbindungen nicht nur auf Anzahl

Diese Tabelle gilt als Prototyp des Periodensystems. Sie erschien in Deutschland 1869 in der »Zeitschrift für Chemie«.

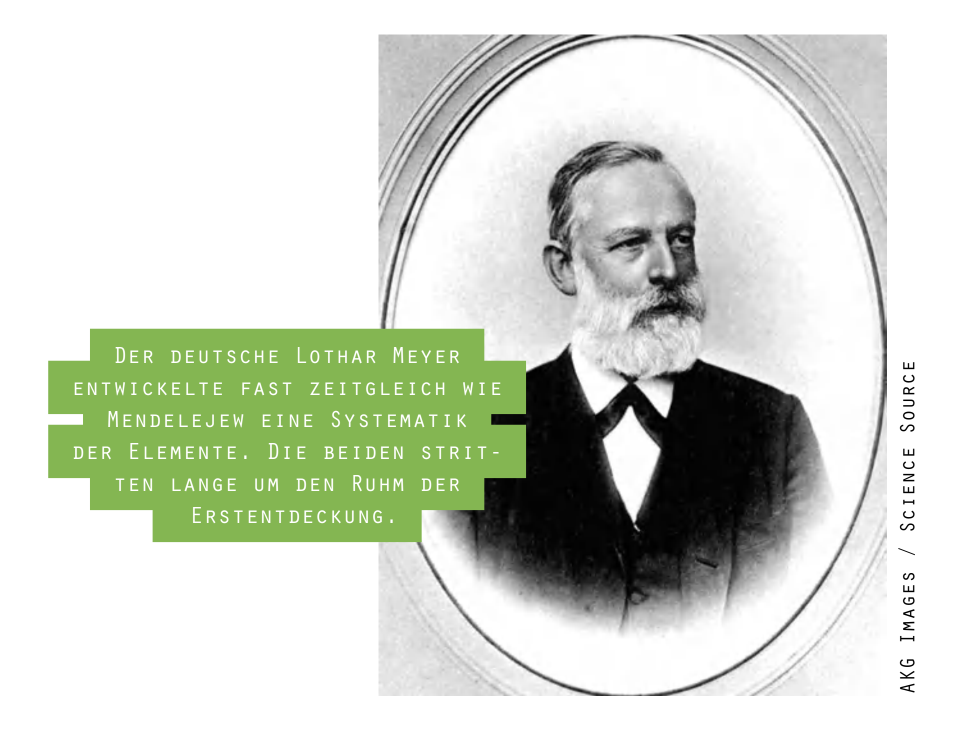
Aus Mendelejeff: Die periodische Gesetzmässigkeit der Elemente. In: Annalen der Chemie und Pharmacie. VIII. Supplementband 1871, S. 133–229

zung für einen langen Streit, der 1880 zum letzten Mal aufflammte. Er wurde erst 1882 mit der Verleihung der britischen Davy-Medaille, der damals höchsten Ehre ihres Fachs, an beide Chemiker beruhigt. Doch auch heute noch gilt meistens nur der Russe als »Vater des Periodensystems«.

Tatsächlich sprechen Mendelejews detaillierte Vorhersagen unbekannter Elemente dafür, seine Leistung höher zu bewerten. Anhand seines Periodengesetzes beschrieb er nicht nur ihre vermutliche Atommasse, sondern beispielsweise auch ihre Salze sowie die Dichte und den Siedepunkt von Verbindungen. Er gab den fehlenden Elementen sogar Namen, zum Beispiel denen, die auf Bor, Aluminium und Silizium folgen sollten: Eka-Bor, Eka-Aluminium oder Eka-Silizium. Eka ist Sanskrit und bedeutet einfach eins. Die Elemente wurden bald gefunden und von ihren Entdeckern Scandium, Gallium und Germanium getauft.

Diese Entdeckungen trugen zum Erfolg des Periodensystems sehr deutlich bei. Manche Historiker meinen, dass gerade die Eignung des Modells zur Vorhersage dessen Rezeption beförderte. Andere sind in ihrem Urteil zurückhaltender. Ralph Cahn sagt: »Mendelejews Vorhersagen sind nirgendwo mathematische Herleitungen, sondern dort, wo er am meisten bewundert wird, eine Mischung aus Extrapolation, Interpolation und vorsichtiger Spekulation.« Eric Scerri von der University of California in Los Angeles ergänzt: »Mendelejew hat 18 Elemente vorhergesagt, von denen nur neun gefunden wurden.« Zu den Fehlprognosen gehören etwa Coronium und Newtonium, die beide leichter sein sollten als Wasserstoff.

Für die Anordnung der Elemente gab und gibt es viele Möglichkeiten. In vielen Lehrbüchern hat sich die auf Seite 4/5 gezeigte zweidimensionale, tabellenartige Darstellung durchgesetzt. Es existieren aber auch Trichter, Pyramiden, Achten, Spiralen oder Sonnen. Bis heute diskutiert die Fachwelt darüber, welche Darstellung am besten geeignet sei. Als man die Edelgase entdeckte, wurden sie zunächst als Gruppe null klassifiziert, weil Mendelejew ein Dutzend Metalle, die nicht in die erste bis siebte Hauptgruppe passten, einer achten zugeordnet hatte – erst später erkannte man Helium, Neon und Co die achte Hauptgruppe zu.



Der deutsche Lothar Meyer entwickelte fast zeitgleich wie Mendelejew eine Systematik der Elemente. Die beiden stritten lange um den Ruhm der Erstentdeckung.

AKG Images / Science Source

Entdeckung der Atomorbitale

Der Erste, der die tabellenartige Darstellung um viele Spalten erweiterte, war 1905 der Schweizer Chemiker Alfred Werner. Sein Langperiodensystem hatte 32 Spalten, genauso viele, wie es Elemente gibt in der sechsten Periode, die mit Cäsium beginnt und mit Radon endet. In der ersten von insgesamt sieben Zeilen gab es nun zwei Einträge, danach je zweimal acht, 18 und 32.

Diese Zahlenwerte – 2, 8, 18, 32 – konnten im Lauf der Zeit die Physik und die Quantenmechanik erklären. Zunächst zeigten Untersuchungen, dass die Reihenfolge der Elemente nicht von der Atommasse, sondern von der Kernladungszahl bestimmt wird. Diese entspricht der Anzahl der positiven Protonen sowie der negativen Elektronen im Atom, heute spricht man von der Ordnungszahl. Ein weiterer Meilenstein war die Erkenntnis, dass die Elektronen in der Nähe des positiv geladenen Atomkerns bestimmte Aufenthaltsräume haben, so genannte Orbitale. Diese gleichen Kugeln oder Keulen und nehmen je nach Form und Nähe zum Kern maximal zwei, sechs, zehn oder 14 Elektronen auf. Addiert man ihre maximale Belegung, ergibt sich die Zahlenfolge 2, 8, 18, 32.

Von all dem konnte Mendelejew nichts ahnen. Er hätte die Erklärung damals vermutlich abgelehnt, auch den radioaktiven Zerfall betrachtete er höchst kritisch. Der russische Chemiker hatte stets die Individualität und Stabilität der Elemente betont, und nun sollte es welche geben, die zerplatzten und sich in andere wandelten! Stattdessen hing er Bernadette Bensaude-Vincent zufolge der Theorie an, dass die großen »Atom-Planeten« wie Uran auf mechanische Weise »Kometen« aussendeten.

Mendelejew sah sich am Ende selbst als eine Art neuer Isaac Newton und trat mit diesem Anspruch sogar vor die Royal Society, wie der Historiker Michael Gordin von der Princeton University schreibt. Der Russe wollte auf der Basis seines rein empirisch erklärten Periodensystems Chemie und Physik vereinen. In einer gewissen Weise ist das auch gelungen, denn beide Wissenschaften nutzen das Periodensystem, das durch die Physik des 20. Jahrhunderts sein theoretisches Fundament erhielt und Platz hat für die im 20. und 21. Jahrhundert entdeckten und eventuell noch zu entdeckenden Elemente.



Der Carinanebel: ein Geburtsort der Sterne. Nach dem Urknall gab es im All zunächst nur Wasserstoff, Helium und Lithium. Nachdem sich die Sterne gebildet hatten, entstanden durch die Fusion von Atomen im Inneren der Sterne weitere, leichte Elemente. Für die schweren bedurfte es einer Supernova.

NASA, ESA, N. Smith (University of California, Berkeley), and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Die Geburt der Elemente

Das Universum beherbergt eine Vielzahl chemischer Grundbausteine. Lange bestand der Kosmos jedoch nur aus einer Hand voll leichter Elemente. Die Schweren erschufen verglühende Sterne.

Aller Anfang ist schwer. Nicht so bei der Geschichte der chemischen Elemente. Da fing es ziemlich leicht an: Wasserstoff, Helium, dazu ein Schuss Lithium – die drei leichtesten Vertreter des Periodensystems bildeten die Zutaten des Universums, das vor knapp 14 Milliarden Jahren seinen Ursprung nahm. Erst viel später entwickelten sich schwerere Elemente und eine chemische Vielfalt, die unter anderem die Basis für das Leben auf der Erde schuf.

In einem anderen Sinne war der Kosmos am Anfang jedoch durchaus »schwer«. Gemäß der Urknalltheorie, der bislang plausibelsten Erklärung für die Entstehung des Universums, war alle Materie zunächst in einem winzigen Punkt konzentriert. Dieser Zustand, den Forscher Singularität nennen, ist derart aberwitzig, dass diesbezüglich nicht nur die menschliche Vorstellungskraft versagt, sondern auch die Physik an ihre Grenzen stößt. Dennoch halten es die meisten Experten für äußerst wahrscheinlich, dass Raum, Zeit und Materie tatsächlich mit einem »Big Bang« entstanden sind. Für die Hypothese spricht, dass die weitere Evolution des Universums damit relativ plausibel erklärt werden kann – auch die der chemischen Elemente.

Das kosmische Spektakel hatte also offenbar einen fulminanten Auftakt. Direkt im Anschluss breitete sich die extrem heiße Ursuppe in einem absurden Tempo im All aus. Schon nach dem Bruchteil einer Sekunde war das Universum so weit abgekühlt – die Temperatur lag immer noch bei unglaublichen 1800 Milliarden Grad –, dass sich die elementaren Bausteine von Materie, die Quarks, zu Protonen und Neutronen zusammenfügen konnten. Damit waren gleichzeitig die ersten Atomkerne geboren: Der Kern des leichtesten Elements Wasserstoff besteht aus einem einzigen Proton. Nur einige Sekunden später begannen sich je ein Proton und ein Neutron zu vereinen und schwere Wasserstoffkerne zu bilden, so genannte Deuteronen. Diese wiederum verschmolzen jeweils mit einem weiteren Proton und einem Neutron zu Atomkernen des zweitleichtesten Elements im Universum: Helium.

Das Massenverhältnis in dem noch jungen Kosmos lag wohl bei rund 75 Prozent Wasserstoffkernen zu 25 Prozent Heliumkernen – mit einer winzigen Prise Lithium. Kosmologen vermuten: Dieser erste Akt der Elemententstehung war nach maximal 20 Minuten vorbei. Die Ursuppe hatte sich inzwischen so weit abgekühlt und verteilt, dass Temperatur und Dichte nicht mehr für weitere Kernfusionsprozesse ausreichten. Man nennt diese Phase, in der das Universum selbst gewissermaßen als riesiges Fusionskraftwerk agierte, die primordiale Nukleosynthese, also die ursprüngliche Bildung von Atomkernen. Sie gilt als eines der wichtigsten Elemente des kosmologischen Standardmodells, das die Entwicklungsgeschichte des Universums beschreibt.

Obwohl die primordiale Nukleosynthese nur drei Sorten Atomkerne hervorgebracht hatte, war innerhalb weniger Minuten bereits die größte Masse der Elemente entstanden: Noch heute bestehen rund 98 Prozent der herkömmlichen Materie des Universums aus Wasserstoff und Helium. Bis die weiteren 88 Elemente hinzukamen, welche die übrigen zwei Prozent ausmachen, sollte noch einige Zeit vergehen.

Dazu mussten erst die »Stars« der Szene auf die kosmische Bühne treten: die

Sterne. Die ersten bildeten sich vermutlich rund 100 bis 400 Millionen Jahre nach dem Urknall aus dichten Gaswolken, die auf Grund der Gravitationskräfte kollabierten. Bei einem solchen Kollaps verdichtet sich die zunächst diffus verteilte Materie um ein Vielfaches, so genannte prästellare Kerne entstehen. Dieser Sternenvorläufer sammelt weitere Materie an und wird zu einem Protostern, der schließlich zu einem echten Stern heranwächst. In dessen Innerem herrschen nun ein enorm hoher Druck und große Hitze – Bedingungen, unter denen Wasserstoff zu Helium fusioniert. Auf dieser so genannten stellaren Nukleosynthese basiert die riesige Menge an Energie, die Sterne freisetzen und die ihnen ihre Strahlkraft verleiht. Irgendwann geht einem Stern der Brennstoff aus, so dass er den Druck im Inneren nicht mehr aufrechterhalten kann und sich auf Grund der eigenen Schwerkraft zusammenzieht. Die Verdichtung und gleichzeitige Erhitzung setzt weitere Fusionsprozesse in Gang. Leichte Atomkerne können nun schrittweise zu schwereren verschmelzen und bringen so neue Elemente hervor. Dabei gilt: je größer der Druck und je höher die Temperatur, desto schwerer die Elemente.

Der zweite Akt der kosmischen Elemententstehung, die stellare Nukleosynthese, dauert bis heute an. Dabei entstehen unter anderem die für das Leben auf der Erde essenziellen Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff; aber auch Metalle, die etwa in der fertigenden Industrie eine wichtige Rolle spielen, wie Aluminium und Eisen.

Wenn Sterne sterben

Alle Elemente, die schwerer sind als Eisen (26 Protonen) – darunter die Edelmetalle Silber, Gold und Platin oder das schwerste bekannte, natürlich vorkommende Element Uran (92 Protonen) –, werden allerdings auf eine andere Art und Weise erzeugt. Denn Atomkerne verschmelzen nur dann, wenn die dafür nötige Menge an Energie kleiner ist als die, die bei der Fusion frei wird. Das ist nur bis zum Element Eisen der Fall. Irgendwann kommen die Fusionsprozesse in einem Stern deshalb zum Erliegen; er erlischt und zieht sich unter seiner eigenen Schwerkraft immer mehr zusammen. Sein weiteres Schicksal hängt nun von seiner ursprünglichen Masse ab.

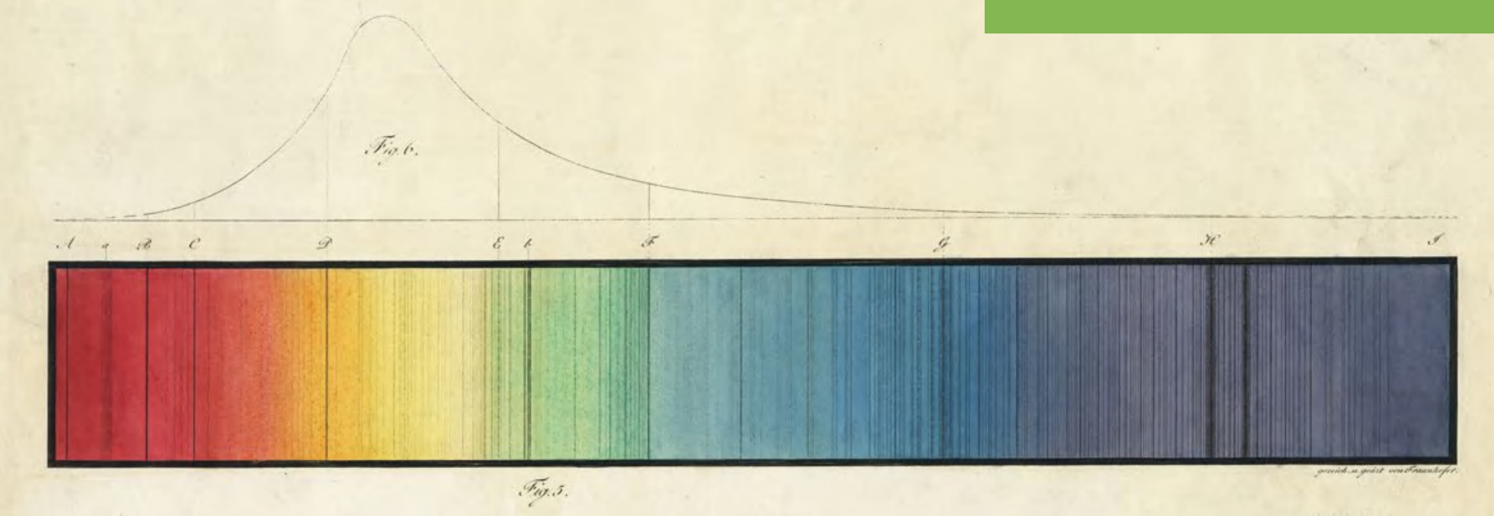
Sterne in der Größenordnung unserer Sonne enden als schwach leuchtende Weiße Zwerge, die sich langsam abkühlen, mitunter über mehrere Milliarden Jahre. Schwere Sterne ab zirka acht Sonnenmassen kollabieren an ihrem Lebensende sehr schnell, so dass die Temperatur im Inneren nochmals stark ansteigt. Schließlich kommt es zu einer gewaltigen Explosion: einer Supernova, bei der ein Großteil der Masse des Sterns in den interstellaren Raum geschleudert wird. Wissenschaftler vermuten, dass sich bei diesem »finale furioso« auch Elemente mit einer höheren Protonenzahl als Eisen bilden.

Generell entstehen solche schweren Elemente durch das Einfangen von Neutronen. Man unterscheidet dabei zwischen dem schnellen r-Prozess und dem langsamen s-Prozess (»r« und »s« stehen für »rapid« und »slow«). Die langsame Variante läuft in Roten Riesensternen ab, die sich in einem späten Entwicklungsstadium befinden. Astronomen sprechen von Sternen des so genannten Asymptotic Giant Branch (AGB).

In AGB-Sternen ist die Dichte freier Neutronen gering, so dass Atomkerne

Das Fraunhofer Spektrum

Die so genannten Fraunhoferlinien sind Absorptionslinien im Spektrum der Sonne – verursacht durch Elemente in der Hülle, die das Licht bestimmter Wellenlängen absorbieren. Mit Hilfe von Spektralanalyse können Astronomen Rückschlüsse ziehen auf die chemische Zusammensetzung von Sternen, da jedes Element ein bestimmtes Muster an Absorptionslinien hervorruft.



Deutsches Museum

jeweils ein einzelnes Neutron einfangen können. Auf diese Weise entsteht ein schwereres Isotop des Elements. Ist der Kern instabil, folgt ein Betazerfall, bei dem sich ein Neutron unter Abgabe eines Elektrons zu einem Proton verwandelt: Das nächst schwerere Element entsteht. Da für den Zerfall genügend Zeit bleibt, bevor ein weiteres Neutron eingefangen wird, spricht man vom langsamen Prozess. Experten schätzen, dass rund die Hälfte aller Elemente, die eine höhere Ordnungszahl als Eisen aufweisen, so geboren werden.

Verräterische Hülle

Bei der schnellen Variante hingegen fängt ein eben geborener Atomkern umgehend etliche Neutronen ein, bevor es zum Betazerfall kommen kann. Meist sind die daraus resultierenden schweren Zwischenprodukte instabil und bilden anschließend durch mehrere radioaktive Zerfälle stabile, neutronenreiche Kerne. Voraussetzung für einen r-Prozess sind wesentlich höhere Temperaturen und Neutronenflüsse als in den AGB-Sternen. Die notwendigen Bedingungen herrschen vermutlich nur in verschmelzenden Neutronensternen und bei einer speziellen Klasse von Supernovae. Um den genauen Ablauf solcher Reaktionen fernab der Kernstabilität zu klären, erzeugen Forscher neutronenreiche Atomkerne mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern.

Um mehr über die Elemente im Universum zu erfahren, liegt es nahe, deren Geburtsorte genauer zu betrachten. Mit großem technischen Aufwand nehmen Astronomen daher die Sterne unter die Lupe. Wenn man so will, handeln sie dabei ziemlich oberflächlich, interessieren sie sich doch vor allem für das Äußere der Sterne. Denn die Hülle spiegelt im Wesentlichen die chemische Komposition der Gaswolke wieder, aus der ein Stern einst hervorgegangen ist, und lässt Rückschlüsse zu auf die Entwicklungsgeschichte der Elemente.

Astronomen untersuchen die so genannten Absorptions- und Emissionslinien eines Sterns. Erstere sind dunkle Linien im Lichtspektrum des Sterns, die auftreten, weil Elemente in der Hülle das Licht bestimmter Wellenlängen absorbieren. Die hellen Emissionslinien gehen auf Elemente zurück, die durch das Licht des Sterns angeregt werden und ihrerseits Licht aussenden. Da jedes Element ein ganz bestimmtes Muster an Absorptions- und Emissionslinien hervorruft, lässt sich die Zusammensetzung der Hülle mittels Spektralanalyse relativ präzise rekonstruieren.

So findet man etwa in der äußeren Schale der Sonne neben den Hauptbestandteilen Wasserstoff und Helium auch Hinweise auf schwerere Elemente, wie Calcium, Eisen, Nickel und Titan. Die entsprechenden Absorptionslinien sind nach ihrem Entdecker Joseph von Fraunhofer benannt, der sie bereits Anfang des 19. Jahrhunderts bemerkte, damals allerdings nicht deuten konnte. Erst Jahrzehnte später deckten Robert Bunsen und Gustav Kirchhoff das zu Grunde liegende Prinzip auf und entwickelten daraus die Spektralanalyse, die rasch zu einem der wichtigsten Werkzeuge von Astronomen wurde.

Vor allem spektroskopische Untersuchungen von leichten Sternen verraten etwas über die Zusammensetzung des jungen Universums. Denn die Lebensdauer eines Sterns nimmt ungefähr mit der dritten Potenz seiner Masse ab. Oder anders ausgedrückt: Übergewicht verringert die Lebenserwartung von Himmelskörpern. Ursache ist, dass in schweren Sternen höhere Drücke und Temperaturen herrschen, wodurch ihr Brennstoff, der Wasserstoff, schneller zur Neige geht. Schwere Exemplare bringen es daher nur auf einige Millionen Jahre, während Leichtgewichte, besonders solche, die leichter als unsere Sonne sind, etliche Milliarden Jahre alt werden können. In unserer Galaxis fahnden Astronomen daher nach schlanken Sternen der ersten Generation, aus der Frühzeit des Alls. Allerdings ist unklar, ob diese tatsächlich existieren. Denn laut den Modellen von Kosmologen bildeten sich im frühen Universum vorrangig Sterne mit großer Masse.

Die häufigsten auf Erden: Eisen, Sauerstoff, Silizium

In diesen Sternen herrschten Drücke und Temperaturen, die ausreichend hoch waren, um Elemente bis hin zu Eisen zu erzeugen, so die gängige Meinung. Das Feuerwerk am Ende ihres Lebens verteilte die Elemente dann im interstellaren Raum. Sterne der zweiten Generation, die sich aus der Asche ihrer Vorgänger bildeten, müssen folglich bereits Spuren von Eisen in ihrer äußeren Hülle aufweisen. Und tatsächlich haben Astronomen solche Sterne anhand der Absorptionslinien von Eisen identifiziert. Diese und weitere Erkenntnisse aus spektroskopischen Analysen sehr alter Sterne stützen auch die Theorie der stellaren Nukleosynthese.

Durch die anhaltende stellare Nukleosynthese reicherte sich der Kosmos sukzessive mit schweren Elementen an. Erst dadurch konnten sich irgendwann Planeten wie die Erde bilden. Sie entstand zeitgleich mit der Sonne vor rund 4,6 Milliarden Jahren. Der exakte Ablauf ist unklar, aber Astrophysiker vermuten, dass um einen Protostern herum zunächst calcium- und aluminiumreiche Silikate kondensierten. Aus dem Staub formten sich Brocken von wenigen Metern Größe. Einer davon sammelte nach und nach immer mehr Materie an: Die Erde wurde geboren. Während die schwersten Elemente, vor allem Eisen, zum Erdmittelpunkt sanken, stiegen leichtere wie Sauerstoff, Silizium und Aluminium nach oben. Aus ihnen entstanden Minerale, die das Gestein der Erdkruste ausmachen. Im Gegensatz zum Weltall und den Sternen, wo Wasserstoff und Helium dominieren, sind Sauerstoff, Eisen und Silizium die häufigsten Vertreter auf unserem Planeten. Diese und zahlreiche weitere Elemente haben ein immenses Spektrum an organischer wie anorganischer Materie auf der Erde hervorgebracht. Ihren Ursprung hat die chemische Vielfalt in den Sternen.

Bausteine des Lebens

Alle Organismen bestehen im Wesentlichen aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff. Zudem übernehmen Phosphor, Schwefel sowie Alkali- und Erdalkalimetalle wichtige Funktionen bei biochemischen Prozessen.

SASHKIN / STOCK.ADOBE.COM

Lebewesen gehören zu den komplexesten Materieformen, die uns bekannt sind. Früher wähnte man die »vis vitalis«, eine mysteriöse »Lebenskraft«, am Werk. Heute wissen wir, dass der Aufbau von Organismen auf den Gesetzen der Physik und Chemie beruht und sich Biomoleküle aus anorganischen Vorstufen zusammensetzen lassen. Dabei hat das Leben eine deutliche Vorliebe für die leichteren, häufigeren Elemente des Periodensystems.

Die sechs häufigsten Elemente in Biomolekülen sind Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Phosphor (P) und Schwefel (S). Allein auf die ersten vier entfallen 99 Prozent der Biomasse der Erde mit den Proteinen und Nukleinsäuren als wichtigsten Biomolekülen. Desoxyribonukleinsäure, kurz DNS oder DNA (englisch: Deoxyribonucleic acid), speichert Informationen, zum Beispiel die Baupläne für Proteine. Letztere übernehmen die operativen Aufgaben in der Zelle wie Stoffwechsel und Signalweitergabe.

Im Zentrum aller Biomoleküle steht Kohlenstoff, der vier Bindungsstellen besitzt und damit vielfältige Verbindungen aufbauen kann, von kleinen Molekülen wie Methan bis zu großen Polymeren wie komplexen Zuckern. Auch Silizium besitzt vier Bindungsstellen. Allerdings ist hier die Bindung zu Sauerstoff so stabil, dass andere Verbindungen, etwa die zwischen zwei Siliziumatomen, nicht zu Stande kommen. Obwohl lediglich Sauerstoff häufiger in der Erdhülle vorkommt, findet man Silizium in Organismen deshalb nur selten. Bei Kohlenstoff ist das anders, denn hier sind die Bindungsenergien von C-O- und C-C-Verbindungen ähnlich hoch. Auf diese Weise konnte die Evolution Biomoleküle hervorbringen, die auf C-C-Bindungen basieren.

Nukleinsäuren bestehen ausschließlich aus C, H, O, N und P, in Form eines Zuckerbausteins, Phosphat und Nukleinbasen, deren charakteristische Abfolge das Alphabet des Lebens darstellt. In Proteinen, den Werkzeugen der Zelle, sind Aminosäuren, die vor allem die Elemente C, H, O und N enthalten, zu Ketten verknüpft. In den Aminosäuren Cystein und Methionin kommt außerdem Schwefel vor, ebenso wie in den B-Vitaminen Biotin und Thiamin. Fette und Kohlenhydrate setzen sich lediglich aus C, H und O zusammen, Phospholipide enthalten zusätzlich Phosphor.

Am einfachsten lässt sich die Häufigkeit bestimmter Elemente in Organismen mit ihrer Verfügbarkeit am Anfang der Entwicklung des Lebens erklären. So ist die Ionenzusammensetzung des Zellsaftes der des Meerwassers auffallend ähnlich – ein starkes Indiz dafür, dass die ersten primitiven Organismen im Meer entstanden. Seltene Elemente wie Gold oder Platin standen dem Leben nicht zur Verfügung und wurden wahrscheinlich aus diesem Grund nicht in Biomolekülen verbaut. Da chemische Reaktionen, die an der Synthese und dem Abbau organischer Verbindungen beteiligt sind, kontrolliert ablaufen müssen, kommen auch besonders reaktive oder instabile, sprich radioaktive Elemente, nicht in Frage. Ebenso ungeeignet scheinen die sehr reaktionsträgen Edelgase oder Edelmetalle, die nur schwer Verbindungen mit anderen Elementen eingehen. Da sich das Leben in flüssigem Wasser entwickelt hat, bestehen auch heutige Zellen immer noch zu einem Großteil daraus. Wasser ist ein gutes Lösungsmittel für viele organische und anorganische Verbindungen und setzt sich zusammen



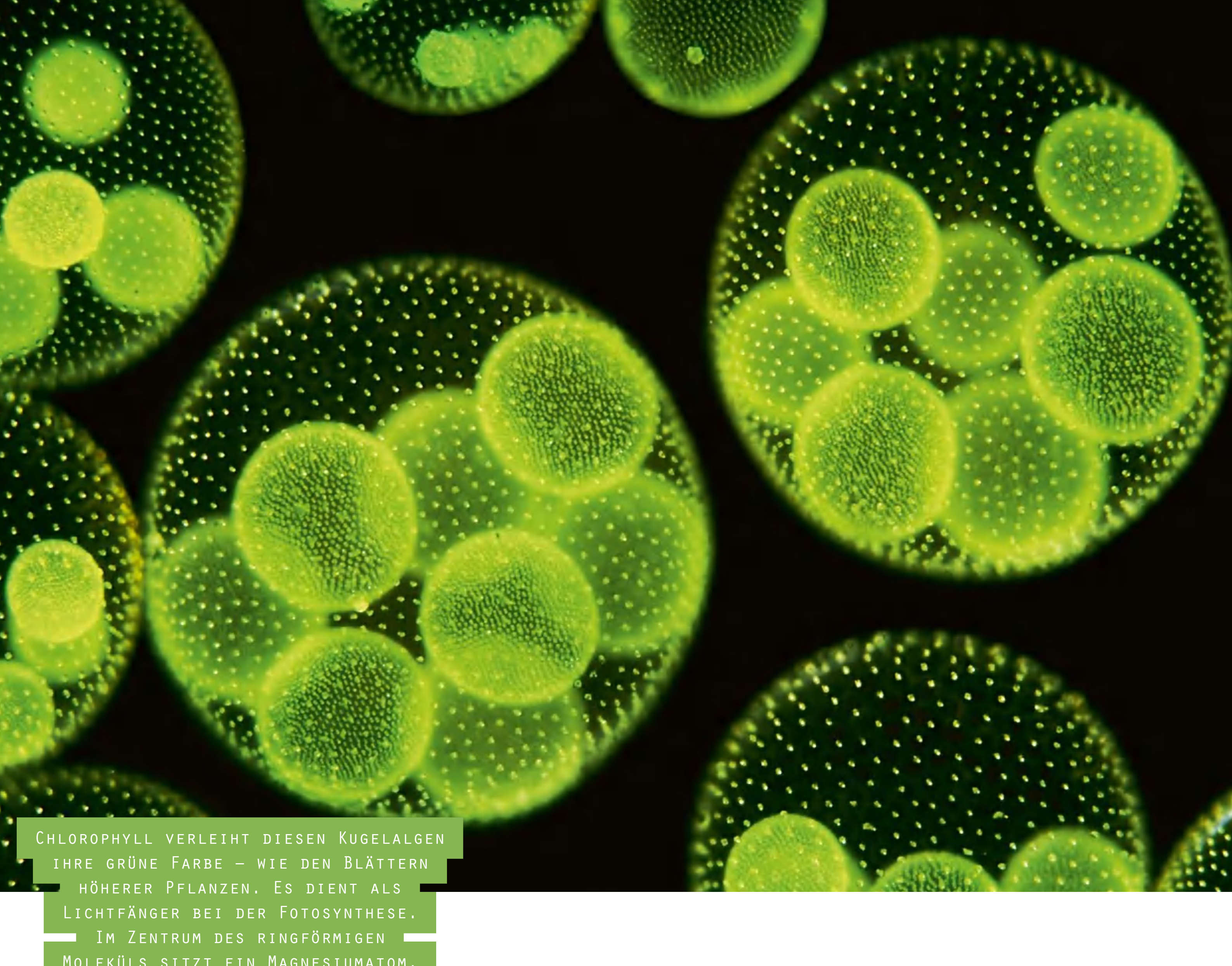
Die DNA verschlüsselt Erbinformation und ist ein zentrales Molekül aller Organismen. Das Gerüst der Doppelhelix besteht aus Zucker und Phosphat. Die Querverstrebungen bilden Nukleinbasen mit Hilfe von Wasserstoffbrücken.

aus den Elementen Wasserstoff und Sauerstoff, die schon allein deshalb zu den häufigsten in Lebewesen gehören. Wasserstoff spielt für universelle Vorgänge zur Energiegewinnung eine herausragende Rolle. Einerlei ob Pflanze, Bakterium, Pilz oder Tier, sie alle erzeugen Protonengradienten über eine Membran, indem sie H^+-Ionen aus dem Zellinneren über die Membran nach außen pumpen. Der Protonengradient treibt dann die Synthese des Energiespeichers Adenosintriphosphat (ATP) an, der übrigens auch aus fünf der »großen Sechs« besteht: C, H, O, N und P.

Mengenmäßig bedeutsam sind außerdem die Mineralstoffe Natrium, Kalium, Chlor, Calcium und Magnesium. Im menschlichen Körper haben sie einen Anteil von mehr als 50 Milligramm pro Kilogramm und werden deshalb im Gegensatz zu Spurenelementen, die in deutlich geringeren Anteilen vorliegen, als Mengenelemente bezeichnet. Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium liegen in der Zelle als Kationen vor, Chlor als Anionen. Durch unterschiedliche Konzentrationen an positiv oder negativ geladenen Teilchen innerhalb und außerhalb der Zellen entsteht eine elektrische Spannung, ein so genanntes Membranpotenzial. Auf diese Weise erzeugt und leitet das Nervensystem Impulse weiter. Magnesiumionen stabilisieren außerdem Biomoleküle wie die DNA oder Membranen und regulieren das Elektrolytgleichgewicht. Der menschliche Körper enthält 20 bis 24 Gramm Magnesium; nach Natrium, Kalium und Calcium ist es damit der vierthäufigste Mineralstoff. Chlorid bildet mit Protonen die Magensäure, und Calciumionen sind an der Blutgerinnung sowie an der Aktivierung mancher Proteine beteiligt.

Eine noch wichtigere Rolle spielt Calcium jedoch beim Aufbau harter Strukturen. So bestehen Muschelschalen, Schneckenhäuser und die Skelette von Steinkorallen aus Calciumcarbonat. Die Knochen der Wirbeltiere wiederum enthalten das Faserprotein Kollagen, an das sich Kristalle aus Hydroxylapatit, einem Calciumphosphat, anlagern. Zahnschmelz, die härteste Struktur im menschlichen Körper, ist ebenfalls daraus gebaut – und fast so hart wie Diamant. Durch Einlagern von Fluorid (F^-) wird dieser resistenter gegen säurehaltige Flüssigkeiten wie Fruchtsäfte. Eine andere Verbindung verleiht dem Skelett von Kieselschwämmen und den Zellwänden von einzelligen Kieselalgen eine hohe Stabilität: Siliziumdioxid, die sehr stabile Verbindung aus Silizium und Sauerstoff.

Spurenelemente wie Eisen, Iod, Zink und Kupfer kommen im menschlichen Organismus nur in winzigen Mengen vor, sind aber trotzdem für viele Prozesse lebensnotwendig und müssen mit der Nahrung aufgenommen werden. Andere Lebewesen, vor allem Pflanzen und Mikroorganismen, benötigen zum Teil in anderen Mengen diese Elemente oder

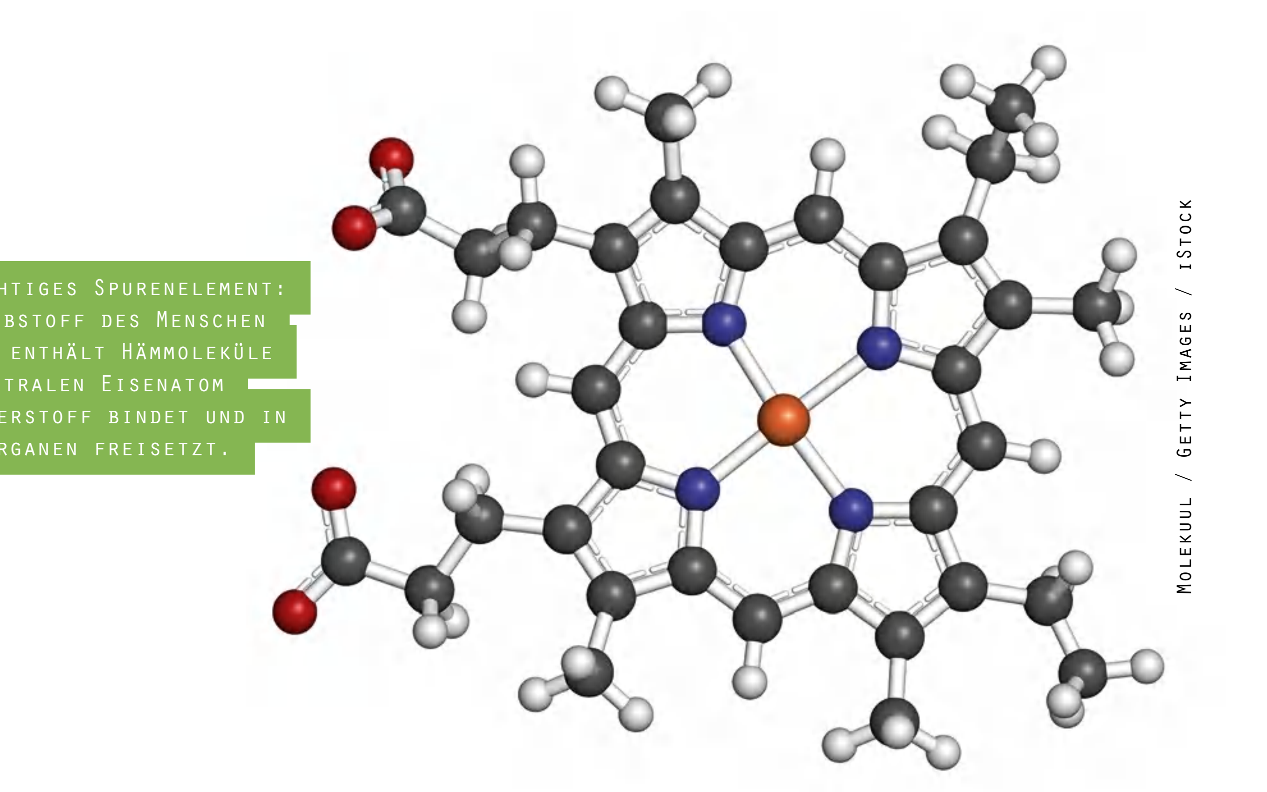


Chlorophyll verleiht diesen Kugelalgen ihre grüne Farbe – wie den Blättern höherer Pflanzen. Es dient als Lichtfänger bei der Fotosynthese. Im Zentrum des ringförmigen Moleküls sitzt ein Magnesiumatom.

verwenden andere Spurenelemente. Eisen spielt beispielsweise eine wichtige Rolle im Hämoglobin, dem roten Blutfarbstoff der Wirbeltiere. Dieser enthält vier Proteinketten, die jeweils eine so genannte Hämgruppe binden. Letztere besteht aus einem Porphyrinring mit einem zentralen Eisen(II)-Atom. Entscheidend für die Funktion des Blutfarbstoffs ist, dass das zentrale Eisen ein Sauerstoffmolekül reversibel bindet und in Organen oder im Muskelgewebe wieder freisetzt. Durch die Sauerstoffbindung wechselt die Farbe des Hämoglobins von dunkelrot zu hellrot. Arterielles, sauerstoffreiches Blut ist deshalb heller als venöses, sauerstoffarmes.

Gliedertiere wie Krebse oder Spinnen und Weichtiere wie Schnecken oder Muscheln nutzen den Blutfarbstoff Hämocyanin. Hier bindet ein Sauerstoffmolekül an zwei Kupferatome, die zwischen den Oxidationsstufen +I und +II wechseln. Lebewesen mit Hämocyanin haben im wahrsten Sinne des Wortes blaues Blut. Sowohl Eisen als auch Kupfer spielen außerdem eine Rolle bei Redoxreaktionen. Diese laufen etwa bei der Zellatmung ab und bei der Lichtreaktion der Fotosynthese. Bei beiden Prozessen werden Elektronen von einem Donor über eine Elektronentransportkette auf einen Akzeptor übertragen. Für den Elektronentransfer braucht es Metalle wie eben Eisen oder Kupfer, die leicht verschiedene Oxidationsstufen einnehmen können. Häufig bilden die Metallionen das katalytische Zentrum eines Enzyms oder Proteinkomplexes.

Ein Beispiel hierfür ist die Cytochrom-c-Oxidase, das letzte Enzym der Atmungskette, in der Elektronen von einem reduzierten, energiereichen Substrat – meist Zucker – auf den Endakzeptor Sauerstoff übertragen werden. Fast alle Tiere, Pflanzen, Pilze und aerobe Bakterien nutzen Sauerstoff als Elektronenakzeptor. Anaerob lebende Mikroorganismen verwenden dagegen andere Endakzeptoren wie Nitrat, Sulfat und Kohlendioxid. Gleich bleibt aber das Prinzip, dass die Elektronen über eine Reihe von Redoxproteinen auf ein jeweils höher oxidiertes Akzeptormolekül übertragen werden. Als Redoxproteine dienen meist Cytochrome, die wie Hämoglobin eine Hämgruppe enthalten. Aber auch Eisen-Schwefel- und Kupfer-Proteine können Elektronen weiterleiten.



Eisen ist ein wichtiges Spurenelement: Der rote Blutfarbstoff des Menschen und vieler Tiere enthält Hämmoleküle mit einem zentralen Eisenatom (orange), das Sauerstoff bindet und in Muskeln und Organen freisetzt.

Molekuul / Getty Images / iStock

Mengenmäßig zwischen Eisen und Kupfer liegt im menschlichen Körper Zink vor. Dieses ist Bestandteil wichtiger Enzyme wie der RNA-Polymerase und der Karboanhydrase, die den pH-Wert im Blutplasma und der Magensäure reguliert. In der Pflanzenwelt spielt Magnesium eine wichtige Rolle: Es bildet das Zentralatom des grünen Blattfarbstoffs Chlorophyll, der Hämoglobin strukturell ähnelt. Beim Menschen benötigen über 300 Enzyme Magnesium als Kofaktor, darunter jene, die an der Bildung oder Spaltung von ATP beteiligt sind.

Neben Eisen, Kupfer und Zink kommen auch »exotischere« Spurenelemente wie Molybdän, Mangan, Vanadium und Kobalt als Zentralatome in Enzymen zum Einsatz. In Pflanzen ist Mangan essenziell für den Proteinkomplex des Fotosystems II, welches Wassermoleküle spaltet und den für uns lebenswichtigen Sauerstoff freisetzt. Der Biokatalysator Superoxiddismutase, der reaktive Superoxid-Anionen entgiftet und vor oxidativem Stress schützt, enthält ebenfalls Mangan.

In einer anderen Gruppe dieser Enzyme, die im Zytoplasma aller Lebewesen mit echtem Zellkern und damit auch beim Menschen vorkommt, findet man dagegen Kupfer und Zink. Molybdänhaltige Enzyme kommen bei allen Lebewesen vor und spielen beispielsweise beim Abbau der Purinbasen der Nukleinsäuren eine Rolle. Des Weiteren dient Molybdän als Kofaktor für das Enzym Nitrogenase, das es Mikroorganismen wie Zyanobakterien erlaubt, Luftstickstoff (N_2) verfügbar zu machen. Einige Bakterien haben zusätzlich eine Nitrogenase entwickelt, die an Stelle des Molybdäns auf Vanadium setzt. Auch manche Braunalgen und Flechten besitzen Enzyme mit Vanadium als Zentralatom zur Oxidation von Halogeniden mit Wasserstoffperoxid.

Kobalt ist Bestandteil der Cobalamine, zu denen das Vitamin B_{12} gehört. Dessen biologisch aktive Form ist als Kofaktor von Enzymen an der DNA-Synthese und am Aminosäurestoffwechsel beteiligt. Für Pflanzen, Mikroorganismen und manche Tiere kann auch Nickel essenziell sein. Beispielsweise ist ein Enzym, das an der mikrobiellen Produktion von Methan beteiligt ist, abhängig vom nickelhaltigen Kofaktor F_{430}. Außerdem tragen manche Wasserstoff bildenden Hydrogenasen und auch das Enzym Urease, das Harnstoff spaltet, ein Nickelatom im Zentrum.

Beim Menschen sind Enzyme bekannt, die positiv geladene Nickelionen enthalten können, etwa die Polynukleotidkinase Clp1. Andere Kationen wie Mangan oder Magnesium scheinen Nickel hier allerdings ersetzen zu können. Inwieweit das Element für Menschen essenziell ist, ist deshalb noch unklar. Selen ist Bestandteil der seltenen Aminosäure Selenocystein, die eine ähnliche Struktur wie Cystein aufweist, aber besser mit Sauerstoff reagiert und sich daher als Radikalfänger eignet. Alle tierischen Zellen enthalten Selenocystein in dem Enzym Glutathionperoxidase, die hilft, membranschädigende Moleküle wie Wasserstoffperoxid zu beseitigen.

Da im Universum dieselbe Vielfalt an chemischen Elementen herrscht wie auf der Erde und die Elemente dort denselben Naturgesetzen gehorchen, darf man vermuten, dass außerirdische Lebensformen existieren. Rein statistisch betrachtet müssten sich für die Entwicklung von Leben günstige Bedingungen – moderate Temperaturen, ständige Energiezufuhr durch ein Zentralgestirn und flüssiges Wasser – auf einer Vielzahl fremder Planeten finden lassen. Die wirklich spannende Frage lautet daher vielleicht nicht, ob es woanders Leben gibt, sondern wie diese Organismen aufgebaut sind und wie sie funktionieren. Die Häufigkeiten der Elemente in fernen Welten könnten jedenfalls anders verteilt sein – und damit andere Elemente die Basis extraterrestrischen Lebens bilden.



Begehrte Metalle

Smartphones werden immer leistungsfähiger: die Displays schärfer, der Sound klarer und die Prozessoren schneller. Ohne verschiedene Technologiemetalle wäre das nicht möglich. Deren Abbau ist jedoch oft problematisch, und die Rohstoffe werden selten recycelt.



Poravute / Getty Images / iStock

Es geht definitiv etwas hektisch zu in der Zeit vor einem Tag wie diesem. Aber es sind auch magische Tage, denn wir dürfen unsere neuesten Innovationen mit euch teilen.« Mit diesen Worten eröffnet Tim Cook das Apple Event. Es ist der 12. September 2018, und Cook steht auf der Bühne des Steve-Jobs-Theaters im Apple Park in Kalifornien. Cook ist Geschäftsführer von Apple und spricht zu eingeladenen Gästen, unter ihnen Vertreter der Presse und Blogger.

Zu den Innovationen, die Apple an diesem Mittwochmorgen vorstellt, gehört unter anderem die nächste Generation des iPhones. Die aktuelle Modellreihe hatte der Konzern erst ein Jahr zuvor präsentiert. Auch andere große Mobiltelefonhersteller wie Samsung und Huawei bringen regelmäßig neue Geräte auf den Markt. Vor der diesjährigen Vorstellung der neuen iPhones wurde wie immer viel spekuliert – darüber, wie sie aussehen und welche neuen Funktionen sie haben würden.

Wenig Beachtung finden dagegen die zahlreichen Metalle, ohne die Technologien wie Smartphones nicht auskommen würden. Dabei besteht jedes Mobiltelefon zu etwa 25 Prozent aus Metallen. Sie finden sich in fast allen Komponenten: auf der Leiterplatte, im Gehäuse, im Display und im Akku. Nur ein Bruchteil davon sind recycelte Rohstoffe. Metalle wie Tantal, Kobalt und die so genannten seltenen Erden werden zudem oft unter fragwürdigen Umständen gewonnen. In den Minen herrschen zum Teil unmenschliche Arbeitsbedingungen, der Handel und die Vergabe von Konzessionen begünstigt Korruption, und der Abbau verursacht große Umweltschäden.





Nun hat Apple-Mitarbeiter Phil Schiller seinen Auftritt. Während sich das Smartphone hinter ihm auf der Leinwand dreht, führt Schiller durch dessen Spezifikationen. Er kommt schließlich auf das Herzstück zu sprechen: den Computerchip. Auf ihm befänden sich 6,9 Milliarden Transistoren, mehr als auf allen vorherigen Telefonen der Firma.

Der Chip ist in jedem Smartphone das Bauteil mit den meisten Metallen. Doch welche genau in den jeweiligen Modellen stecken und in welcher Menge, verraten die Hersteller nicht. Der Gehalt an Metallen und deren Zusammensetzung wird daher häufig erst bekannt, wenn ein Smartphone in großer Stückzahl in Recyclinganlagen landet – in der Regel also einige Jahre nach Markteinführung. Genauere Untersuchungen darüber, was in unseren mobilen Begleitern steckt, gibt es kaum, auch weil ständig neue Modelle erscheinen.

Ein Potpourri an Metallen

Eine Ausnahme bildet hier eine Studie der Geologin Britta Bookhagen von der deutschen Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Sie und ihre Kollegen zerlegten die drei im Jahr 2012 meistverkauften Smartphones in ihre Einzelteile. Anschließend analysierten sie die Bestandteile der Leiterplatten, auf denen sich der Chip befindet. Allein dort fanden sie rund 50 verschiedene Metalle und Halbmetalle. Darunter Alkali- und Erdalkalimetalle wie Lithium und Magnesium, Übergangsmetalle wie Tantal und Kupfer, das Leichtmetall Aluminium, Edelmetalle wie Gold, Silber und Platin sowie die seltenen Erden Neodym und Dysprosium.

Woher stammen diese Metalle? Die kurze Antwort lautet: aus der ganzen Welt. Kupfer etwa wird vor allem in Chile und Peru abgebaut und Aluminium in vielen verschiedenen Ländern, darunter Deutschland, Norwegen und Kanada. Einige Metalle lagern in politisch stabilen Regionen – andere nicht. Ein begehrtes, aber problematisches Element ist Tantal. Man kann aus Tantal besonders kleine Kondensatoren herstellen. In der Erdkruste liegt es vor allem zusammen mit Niob in den Mineralen Columbit und Tantalit vor, die auch als Koltan bekannt sind.

Knapp die Hälfte an Tantal in unseren Smartphones stammt aus Burundi, Ruanda und der Demokratischen Republik Kongo. Die Koltanförderung in diesen Ländern wurde in der Vergangenheit mehrfach kritisiert. Die Minenbetreiber würden ihre Arbeiter ausbeuten und unter menschenunwürdigen Bedingungen schuften lassen. Auch Kinderarbeit ist offenbar keine Seltenheit. Hinzu kommt, dass sich in einigen Regionen Rebellengruppen durch den Abbau von Koltan finanzieren.





Mobiltelefone enthalten dutzende Metalle. Nur etwa jedes zehnte Gramm wird in Europa recycelt.



Poravute / Getty Images / iStock



Die Europäische Kommission hat deshalb ein Gesetz erlassen, das Unternehmen ab 2021 dazu verpflichtet, so genannte Konfliktminerale nur noch aus verantwortlichen Quellen zu beziehen. Zu den Konfliktmineralen zählen außer Tantal auch Zinn, Gold und Wolfram. Sie alle stecken in Smartphones: Zinn als Lötzinn auf der Leiterpleite, Gold in den Kontakten und Wolfram in der vibrierenden Einheit. In den USA schreibt der so genannte Dodd-Frank-Act Firmen seit 2010 vor, ihre Lieferketten zu überprüfen und offenzulegen, ob ihre Produkte Konfliktrohstoffe enthalten.

Es gibt auch regierungsunabhängige Initiativen, zum Beispiel die ITRY Tin Supply Chain Initiative (iTSCi), die Lieferketten zertifiziert und Smartphoneherstellern so garantiert, dass verbaute Komponenten ausschließlich aus konfliktfreien Mineralen bestehen. Einige große Elektronikhersteller, darunter Apple und Microsoft, sind Partner der Initiative.

»Jetzt komme ich auf die Lebensdauer des Akkus zu sprechen«, kündigt Phil Schiller gegen Ende der Präsentation der neuen iPhones an. »Alle Nutzer von Smartphones wollen mehr Leistung, größere Bildschirme, aber auch eine längere Lebensdauer des Akkus.« Mit dem neuen Smartphone, so Schiller, könne man sich ganze 30 Minuten länger vergnügen, ehe die Batterie schlapp macht.

Der in elektronischen Geräten am weitesten verbreitete Akkutyp sind Lithium-Ionen-Batterien. Beim Entladen bewegen sich Lithiumionen von der Anode zur Kathode und Elektronen in die entgegengesetzte Richtung, so dass Strom fließt. Als Kathodenmaterial dienen in den Akkus häufig Lithiumkobaltoxide.

Ein Großteil des Kobalts für die Kathoden wird im Kongo gefördert. Im Jahr 2016 waren es 66 000 Tonnen, rund die Hälfte der Weltproduktion. Die steigende Nachfrage nach Elektrofahrzeugen, die meist ebenfalls kobalthaltige Lithiumbatterien enthalten, verteuert Kobalt zunehmend: Seit 2016 hat sich der Preis für das Metall vervierfacht.

Derweil berichtet unter anderem die Menschenrechtsorganisation Amnesty International von prekären Arbeitsbedingungen in den Kobaltminen des Kongo. Ähnlich wie beim Abbau von Koltan schuften Minderjährige hier für ein paar Dollar bis zu zwölf Stunden täglich – ohne Sicherheitsausrüstungen wie Handschuhe und Gesichtsmasken. Zwischen September 2014 und Dezember 2015 sollen 80 Minenarbeiter beim Abbau von Kobalt gestorben sein. Nach Schätzungen von UNICEF arbeiteten 2014 in den Bergwerken des Kongos rund 40 000 Kinder.

Trotzdem klammern sowohl das neue EU-Gesetz zu Konfliktmaterialien als auch der in den USA wirksame Dodd-Frank-Act Kobalt aus. Die Chinesische Handelskammer für Metalle, Minerale und Chemikalien hat inzwischen auf die Kritik an der Kobaltproduktion reagiert und die »Responsible Cobalt Initiative« angekündigt. Zusammen mit Elektronik- und Automobilherstellern will man daran arbeiten, die Wertschöpfungskette transparenter zu gestalten und Kinderarbeit zu verhindern.

Viele Zwischenhändler

Für die Hersteller ist es oft schwer nachzuvollziehen, woher die Rohstoffe stammen. Zum Beispiel gelangen kobalthaltige Erze, nachdem sie gewaschen und zerkleinert wurden, zunächst auf lokale Märkte. Dort kaufen – oft chinesische – Händler das Rohmaterial und verkaufen es weiter an Raffinerien, die es einschmelzen und so reines Kobalt gewinnen. Das begehrte Metall wird verschifft und an die Hersteller von Batteriekomponenten geliefert. Die wiederum landen bei Firmen, die Akkus produzieren. Rund 90 Prozent der weltweit hergestellten Lithium-Ionen-Batterien werden in China gefertigt. Technologiekonzerne wie Apple und Samsung verbauen die Akkus schließlich in Smartphones und anderen Elektronikgeräten.

Apple gibt an, seit 2016 alle Raffinerien zu überprüfen, die Zinn, Tantal, Wolfram, Gold und Kobalt für die Produkte des Unternehmens liefern. Das soll etwa helfen, Kinderarbeit zu vermeiden. Der US-amerikanische Fernsehsender CNN berichtete im Mai 2018, dass Apple erwäge, Kobalt zukünftig direkt von kongolesischen Minen zu beziehen, um die Arbeitsbedingungen der Minenarbeiter besser kontrollieren zu können.

Die Förderung von für Smartphones unersetzlichen Metallen ist nicht nur aus sozialer Sicht problematisch, sie kann auch für die Umwelt erhebliche Folgen haben. Das zeigt die Produktion von seltenen Erden, zu denen die Lanthanoide sowie die Elemente Yttrium und Scandium gehören.

In Smartphones werden unter anderem die seltenen Erden Neodym und Cer verbaut. Aus Neodym lassen sich leichte und zugleich leistungsstarke Magnete für die Mikrofone und Lautsprecher der Telefone herstellen. Ceroxid dient als Poliermittel für die Touchscreens von Smartphones und Tablets.

Neodym und Cer zählen zwar zu den seltenen Erden, kommen in der Erdkruste aber genauso häufig vor wie Nickel und Kupfer. Sie gelten als selten, weil ihre Förderung schwierig ist. Beim Abbau des Gesteins wird radioaktives Uran und Thorium freigesetzt. Außerdem kommt bei der Aufreinigung von Neodymerzen Fluorwasserstoff zum Einsatz. Zum einen entstehen dabei die extrem schädlichen Treibhausgase Tetrafluormethan und Hexafluorethan, zum anderen ist die Verbindung hochgiftig und stark ätzend. Die Förderung von Neodym birgt daher gesundheitliche Risiken für die Arbeiter.

Mehr als 80 Prozent der Weltproduktion an seltenen Erden entfällt auf China und hat in dem Land bis heute beträchtliche Umweltschäden verursacht. Etwa in Baotou, einer Industriestadt in der Inneren Mongolei, wo die toxischen Abfälle, die beim Erzabbau entstehen, in einen künstlichen See geleitet werden.

Prinzipiell könnte der Bedarf an Rohstoffen verringert werden, indem man



Picture Alliance / Reuters / Jonny Hogg

Die Akkus vieler Smartphones enthalten Kobalt. Oft kommt es aus Minen im Kongo, in denen auch Kinder schuften.

die Metalle ausgedienter Mobiltelefone recycelt. Die Wiederverwertung scheitert jedoch unter anderem daran, dass nur die wenigsten ihr altes Telefon an entsprechenden Sammelstellen abgeben. Experten schätzen die Recyclingrate in Europa auf zwölf Prozent. Nach einer Hochrechnung des Bundesverbands Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien (Bitkom) lagen 2015 in Deutschland 100 Millionen ungenutzte Handys in den Schubladen – Tendenz steigend. Die Mobiltelefone, die entsorgt werden, landen meist im Hausmüll, sprich, in der Verbrennungsanlage oder auf der Müllkippe.

Dabei lohnt sich die Wiederverwertung bestimmter Metalle durchaus. Britta Bookhagen und ihre Kollegen errechneten, dass die von ihnen analysierten Smartphones mehr als 6 Gramm Kupfer, 17 Milligramm Gold, 11 Milligramm Silber und 2 Milligramm Palladium enthielten, was einem Gegenwert von zirka 1,15 Euro entsprach. Bei 1,4 Milliarden Smartphones, die im Jahr 2016 weltweit über den Ladentisch gingen, summiert sich der Wert an allein diesen Metallen auf mehr als 1,5 Milliarden Euro!

Für einige Metalle ist die Wiederverwertung allerdings bislang nicht wirtschaftlich, und es fehlen entsprechende Recyclingverfahren. Elemente wie Gallium, Indium und die seltenen Erden sind nur in winzigen Mengen in Mobiltelefonen enthalten, was die Rückgewinnung erschwert. Außerdem sind sie oft so verbaut, dass man sie schlecht wieder abtrennen kann.

Das Recycling selbst kann jedoch auch problematisch sein. Um Metalle erneut verarbeiten zu können, müssen sie eingeschmolzen werden. Dafür sind meist sehr hohe Temperaturen nötig – und damit eine Menge Energie. Ein Teil des Elektroschrotts aus reichen Nationen landet zudem in afrikanischen Staaten, in Indien und China – und das nicht immer legal. In der chinesischen Stadt Guiyu, wo alte Geräte ausgeschlachtet werden, hat das dramatische Folgen: Fast alle der dort lebenden Kinder haben erhöhte Bleikonzentrationen im Blut, es gibt mehr Fehlgeburten als in anderen Städten, und die Flüsse und das Grundwasser sind mit Schadstoffen belastet. Die chinesische Regierung hat der massenhaften Mülleinfuhr vor allem aus Europa und der USA nun Einhalt geboten: Seit Anfang 2018 darf unter anderem kein Elektroschrott mehr importiert werden.

Technische Innovationen haben ihren Preis. Trotzdem legen sich mehr als 60 Prozent der deutschen Smartphonenutzer mindestens einmal im Jahr ein neues Telefon zu. Hersteller wie Apple fördern die Wegwerfmentalität. Sieben Jahre nach dem Kauf eines Produktes bietet das Unternehmen keine Ersatzteile und keinen Service mehr an. Für eine längere Lebensdauer scheinen viele Smartphones ohnehin nicht ausgelegt zu sein.

Dass es auch anderes geht, beweisen das niederländische Unternehmen Fairphone und der deutsche Familienbetrieb Shift. Sie verkaufen modulare Mobiltelefone mit austauschbaren Komponenten. So muss nicht gleich ein neues Telefon her, wenn etwa nur der Bildschirm kaputt ist oder der Akku schwächelt. Beide Firmen bemühen sich zudem, die Lieferketten der einzelnen Komponenten offenzulegen und keine Teile zu verbauen, die Metalle aus ethisch fragwürdigen Quellen enthalten. Das Shiftphone schafft es, auf Konfliktmaterial komplett zu verzichten: Für die Mikrokondensatoren des Telefons verwendet die Firma Keramik statt Tantal. Zwar hinken die modularen Smartphones den neusten Geräten von Apple, Samsung und Co technisch bisweilen ein wenig hinterher. Dafür aber stehen sie für eine sozial gerechtere und nachhaltigere Produktion von Smartphones.

Künstliche Schwergewichte

In einem Teilchenbeschleuniger in Darmstadt lassen Wissenschaftler Atomkerne kollidieren und erschaffen so neue chemische Elemente.

Darmstadtium, Roentgenium und Copernicium – das sind nicht etwa römische Siedlungen, sondern superschwere Elemente mit den Ordnungszahlen 110 bis 112, die Kernphysiker am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Mitte der 1990er Jahre in Darmstadt entdeckt haben.

Zur Erschaffung besonders massereicher Elemente nutzen die Forscher am GSI einen 120 Meter langen Teilchenbeschleuniger. In diesem Tunnel beschleunigen sie elektrisch geladene Atome (Ionen) auf etwa zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit – 30 000 Kilometer pro Sekunde. Anschließend lassen sie die Minigeschosse auf Atomkerne prallen, die auf einer Folie aufgedampft sind. Auf Grund der hohen Geschwindigkeit können die Atomkerne die enorme Abstoßungskraft, die zwischen ihnen wirkt, überwinden und miteinander verschmelzen. So entstehen Elemente, die schwerer sind als Uran, das mit 92 Protonen schwerste natürlich vorkommende Element (Ordnungszahl 92).

Die Darmstädter Wissenschaftler haben dem Periodensystem auf diese Weise bereits sechs Elemente hinzugefügt. Sie tragen die Ordnungszahlen 107 bis 112. Das Element Darmstadtium mit der Ordnungszahl 110 zum Beispiel ging aus der Fusion eines Nickelkerns (28 Protonen) und eines Bleikerns (82 Protonen) hervor. Aber: Die Schwergewichte sind äußerst kurzlebig. Sie zerfallen innerhalb von Sekundenbruchteilen in leichtere Atome und lassen sich daher nicht direkt nachweisen. Dass sie dennoch für einen Wimpernschlag existieren, können die Forscher nachweisen, indem sie die beim radioaktiven Zerfall ausgesandte Strahlung messen. Zudem bilden sich nach einigen Zerfallsschritten stabilere Atomkerne, die aus früheren Experimenten wohlbekannt sind. Daraus lässt sich auf den am Beginn der Zerfallskette stehenden Atomkern schließen.

Neben den eigenen Entdeckungen gelang es den Forschern am GSI auch die ihrer russischen Kollegen zu bestätigen: Die Elemente mit den Ordnungszahlen 114 bis 117. Das aktuell schwerste, künstliche Mitglied im Periodensystem ist Oganesson, auf Position 118.

Atome mit einer extrem hohen Anzahl an Protonen und Neutronen, die auf der Erde nicht natürlich vorkommen, helfen Wissenschaftlern, Prozesse im Kosmos besser zu verstehen. Darüber hinaus vermuten Kernphysiker auf Basis experimenteller Beobachtungen eine »Insel der Stabilität« im Periodensystem. Dort könnte es superschwere Elemente mit einer vergleichsweise langen Lebensdauer und möglicherweise einzigartigen chemischen und physikalischen Eigenschaften geben.

A. Zschau, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung



Am Ende dieser Röhre verschmelzen Atomkerne zu neuen Elementen.

Links

International Year of the Periodic Table

www.iypt2019.org

GDCh – Internationales Jahr des Periodensystems

www.gdch.de/service-information/jahr-des-pse.html

IUPAC – Internationale Union für reine und angewandte Chemie

www.iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/

Database of Periodic Tables

www.meta-synthesis.com/webbook/35_pt/pt_database.php?Button=Data+Mapping

Welt der Physik – Entstehung der Elemente

www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/hadronen-und-kernphysik/elemententstehung-underzeugung/

Neutron Stardust and the Elements of Earth

www.nature.com/articles/s41557-018-0190-9.pdf

Die Zeit - Bausteine des Menschen

www.zeit.de/wissen/2010-07/infografik-baustein.pdf

European Chemical Society – Element Scarcity

www.euchems.eu/euchems-periodic-table/

The Chemical Elements of a Smartphone

www.compoundchem.com/2014/02/19/the-chemical-elements-of-a-smartphone/

The Making of Moscovium

www.nature.com/articles/s41557-018-0185-6.pdf

Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

www.gsi.de/forschungbeschleuniger/forschung_ein_ueberblick/neue_elemente.htm

A New Period in Superheavy-Element Hunting

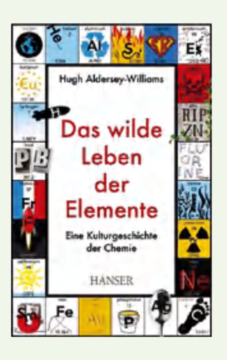
www.nature.com/articles/s41557-018-0191-8.pdf

Bücher

Hugh Aldersey-Williams

Das wilde Leben der Elemente

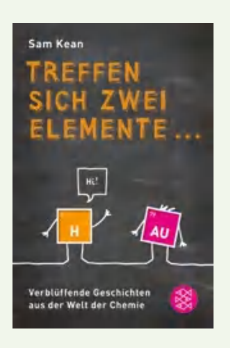
2011
Hanser
464 Seiten
€ 24,90



Sam Kean

Treffen sich zwei Elemente ...

2013
Fischer
448 Seiten
€ 9,99



Luitgard Marschall/ Heike Holdinghausen

Seltene Erden

2017
oekom
240 Seiten
€ 24,–

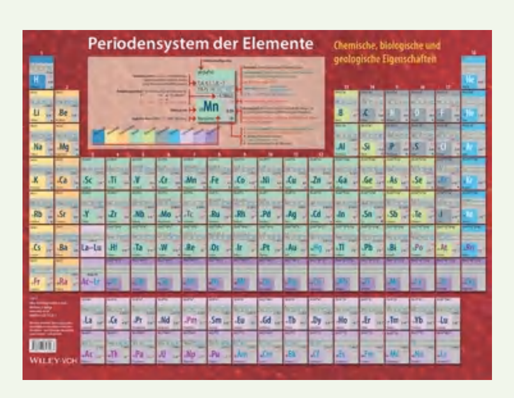


Poster

Ekkehard Fluck / Klaus G. Heumann

Periodensystem der Elemente

2017, Wiley-VCH, Weinheim, € 9,90



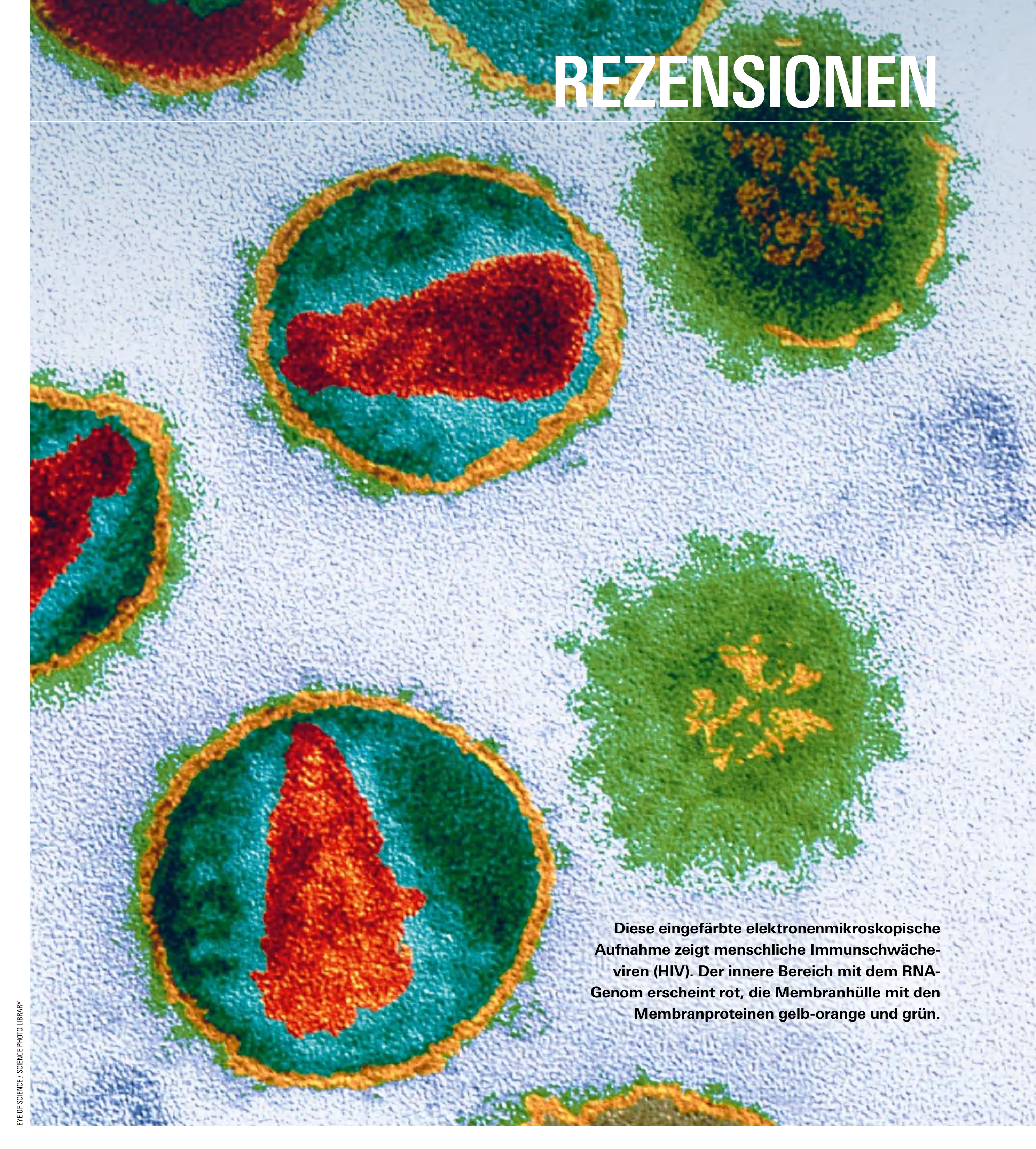


Gesellschaft
Deutscher Chemiker

Impressum

Herausgeber: Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.
Varrentrappstraße 40–42, 60486 Frankfurt/Main
Projektkoordination: Dr. Karin J. Schmitz,
Maren Mielck

Eine Publikation von: Spektrum CP
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg
www.spektrum-cp.de
Leitung: Ann-Kristin Ebert
Redaktion: Dr. Tim Kalvelage
Texte: Dr. Janosch Deeg, Dr. Anna Clemens,
Christopher Schrader, Dr. Larissa Tetsch
Layout: Oliver Gabriel,
Anke Heinzelmann, Karsten Kramarczik
Schlussredaktion: Sigrid Spies, Katharina Werle
Herstellung: Natalie Schäfer



Diese eingefärbte elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt menschliche Immunschwächeviren (HIV). Der innere Bereich mit dem RNA-Genom erscheint rot, die Membranhülle mit den Membranproteinen gelb-orange und grün.

EYE OF SCIENCE / SCIENCE PHOTO LIBRARY

VIROLOGIE

NICHT RICHTIG TOT, NICHT RICHTIG LEBENDIG

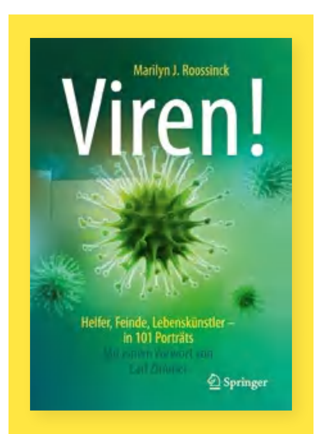
Eine Mikrobiologin stellt die erstaunlich facettenreiche Welt der Viren vor.

Ärzte in Schutzanzügen, überfüllte Krankenhäuser und Patienten auf Intensivstationen: Solche Bilder haben viele vor dem inneren Auge, wenn sie den Begriff »Virus« hören. Doch das unterschlägt, welch enorme Vielfalt diese infektiösen Partikel aufweisen – und welch positive Eigenschaften etliche von ihnen haben.

Die Autorin Marilyn J. Roossinck ist Professorin für Pflanzenpathologie und Umweltmikrobiologie an der Pennsylvania State University. In der Einführung ihres Buchs legt sie dar, wie schwer die Antwort auf die Frage fällt, was Viren eigentlich sind: »Das Problem ist, dass jedes Mal, wenn sie (die Forscher) glauben, eine gute Definition gefunden zu haben, jemand ein Virus entdeckt, das nicht dazu passt (…).« Früher meinten Forscher beispielsweise, Viren seien zu klein, um sie

in einem Lichtmikroskop sehen zu können – bis sie Riesenviren entdeckten, die größer als Bakterien sind. Roossinck geht auf die Größenverhältnisse und -unterschiede der infektiösen Partikel ein, erklärt Grundlegendes zu deren Systematik und Lebensweise. Die wichtigste Gemeinsamkeit der Viren ist demnach, dass alle eine Wirtszelle brauchen, um sich darin zu vervielfältigen.

Der zweite Buchteil präsentiert 101 Porträts ausgewählter Viren, jeweils veranschaulicht mit eingefärbten elektronenmikroskopischen Aufnahmen. Es macht große Freude, durch diesen Teil zu blättern, allerdings wäre es hilfreich gewesen, hätte die Autorin die Bilder mit Angaben zum jeweiligen Durchmesser beziehungsweise zur Größe versehen.



Marilyn J. Roossinck
VIREN!
Helfer, Feinde, Lebenskünstler – in 101 Porträts
Aus dem Englischen von Lothar Seidler
Springer, Berlin und Heidelberg 2018
256 S., € 24,99

So schwierig es ist, Viren zu definieren, so schwer ist es auch, sie zu ordnen. Roossinck fasst die Erreger anhand ihrer Wirte zusammen. Das ist sinnvoll, denn die entsprechenden Gruppen zeichnen sich durch viele Ähnlichkeiten aus. Weniger gut gelungen erscheint die Anordnung der Viren innerhalb der Wirtsgruppen. In der englischen Originalausgabe sind die Viren alphabetisch sortiert. Ihre Reihenfolge wurde in der übersetzten deutschen Fassung beibehalten, was wegen der teils anders lautenden Namen zu Verwirrung führt. Um das Buch als Nachschlagewerk zu nutzen, wäre es besser gewesen, die alphabetische Gliederung auch im Deutschen beizubehalten. Eine andere Möglichkeit hätte darin bestanden, die Erreger nach der Art ihres Erbguts beziehungsweise des Fortpflanzungsmechanismus zu ordnen. Dann hätten sich verwandte Viren nah beieinanderbefunden.

Mit Hilfe von Viren haben Forscher zentrale Erkenntnisse zur Struktur und Organisation des Erbguts gewonnen. Bis heute sind die infektiösen Partikel ein wichtiges Werkzeug der Molekularbiologie. Roossinck stellt Meilensteine der Virenforschung vor. Dabei fällt auf, wie schnell die jüngsten Durchbrüche etwa bei Impfstoffen aufeinander folgten. Allerdings bedrohen Viren immer noch unsere Gesundheit, denn sie können sich rasch verändern und passen sich auch an menschengemachte Veränderungen wie den Klimawandel oder Monokulturen an. Wechseln sie infolgedessen ihre Wirte oder Überträger, können sie völlig unerwartet Epidemien oder Pandemien auslösen. Das geschah beispielsweise (wahrscheinlich) bei der Spanischen Grippe 1918. Der Zikavirus-Ausbruch 2015/16 taucht in dem Buch, dessen Chronologie seltsamerweise bereits 2014 endet, nicht auf.

Den Wirt krank zu machen, ist für Viren eher unvorteilhaft

Den Wirtsorganismus krank zu machen oder gar zu töten, ist für Viren eigentlich von Nachteil, denn dann können die Wirte sich schlechter oder überhaupt nicht mehr fortpflanzen, womit sich die Erreger ihre eigene Vermehrungsgrundlage entziehen. Bei vielen Viren haben sich daher Eigenschaften ausgeprägt, die dem Wirt nützen, etwa beim Curvularia-Thermal-Tolerance-Virus. Wie sein Name nahelegt, hilft der Erreger einer Pflanze, bei hohen Temperaturen zu wachsen. Roossinck macht den Lesern mit Hilfe dieses Beispiels bewusst, wie komplex die Beziehungen zwischen Viren und ihrer Umwelt sein können: Nur wenn ein bestimmter Pilz, der das Curvularia-Thermal-Tolerance-Virus trägt, die Pflanze besiedelt, kann diese die Temperaturen des Yellowstone-Nationalparks ertragen.

Der pflanzen- und umweltbiologische Hintergrund der Autorin macht sich schon in der Einleitung des Buchs bemerkbar, wo sie den Lebenszyklus und das Immunsystem von Pflanzen und deren Viren detailliert erklärt. Die Immunität von Menschen und Wirbeltieren reißt sie hingegen nur kurz an. Insgesamt porträtiert sie beinahe ebenso viele Pflanzen- wie Humanviren. Das hat Nach-, aber ebenso Vorteile. Einerseits dürften sich die meisten Leser mehr für Human- als für Pflanzenpathogene interessieren; andererseits lernen sie in dem Buch dadurch auch weniger bekannte Erreger und ihre Wirte kennen und erfahren manch Überraschendes. So gibt es Viren, die uns helfen können, Krankheiten zu bekämpfen: *Cryphonectria hypovirus* infiziert und schwächt einen Pilz, der beim Kastanienbaum Krebs auslöst. Bestimmte Bakterienviren (Phagen) wiederum können Krankheitserreger wie Tuberkulosebakterien abtöten.

Roossinck gibt einen wertvollen Einblick in die Vielfalt der infektiösen Partikel und ihre komplexen Wirtsbeziehungen. Allerdings benötigen die Leser hier und da molekularbiologische Grundkenntnisse, etwa um die Lebenszyklen der Viren nachvollziehen zu können.

Die Rezensentin Annika Röcker ist promovierte Virologin und Wissenschaftsjournalistin.

RAUMFAHRT
ATEMLOS ZUM MOND

Dieses Buch erzählt vom Wettlauf zum Erdtrabanten und greift dabei manche weniger bekannte Anekdote auf.

Kurz vor Heiligabend des Jahres 1968 änderte sich das Weltbild der Menschheit so dramatisch wie seit

den Zeiten von Christoph Kolumbus nicht mehr. Die amerikanischen Astronauten Frank Borman, Jim Lovell und Bill Anders saßen in ihrer Apollo-8-Raumkapsel und hatten den Mond schon dreimal umrundet. Gerade kamen sie wieder hinter dem Erdtrabanten hervor, als sich Bormann ein verblüffender Anblick bot:



Ulli Kulke
'69
Der dramatische Wettlauf zum Mond
Langen Müller, Stuttgart 2018
221 S., € 22,–

Er sah aus dem Fenster und erblickte die Erde über dem Horizont des Monds. »Hier geht die Erde auf. Mein Gott, ist das schön«, teilte der Astronaut per Funk mit. Das Foto dieser Szenerie, das die Crew kurz danach schoss, wurde zur Ikone, zur meistkopierten Aufnahme des Jahrhunderts und zum Sinnbild für den Leitspruch »Wir haben nur eine Erde«.

Jene für die Raumfahrt so historischen Minuten beschreibt der Journalist Ulli Kulke in diesem Buch. Anhand von Tonbandaufnahmen geht er minutiös den Geschehnissen in der Raumkapsel nach, als die drei Raumfahrer den Erdaufgang sahen, nach ihrer Rückkehr zur Erde aber nicht mehr wussten, wer fotografiert und wer das Szenario als Erster erblickt hatte.

Genau solche Anekdoten sind es, die Kulkes Buch lesenswert machen. Der Autor beleuchtet die eher unbekannten Geschehnisse des Wettlaufs zum Mond. Vor allem erzählt er die Geschichte von Apollo 8, der ersten Mission, die in einen Mondorbit führte und damit fast spannender war als die eigentliche Landung. Denn erstmals das Schwerefeld der Erde zu verlassen und sich in eine andere, lebensfeindliche Welt zu begeben, war mit vielen Unwägbarkeiten verbunden. Bei den späteren Missionen konnten die Astronauten und Ingenieure auf die dabei gesammelten Erfahrungen zurückgreifen.

Dankenswerterweise stellt Kulke die sowjetischen Bemühungen, den Weltraum und den Mond zu erobern, ebenso dar wie die Erfolge der Amerikaner. Die Sowjets verwiesen die Amerikaner oft auf den zweiten Platz, etwa als sie den ersten funktionstüchtigen Satelliten in die Erdumlaufbahn beförderten, das erste Lebewesen (die Hündin Laika) in den Weltraum schickten, den ersten Mann und die erste Frau ins All entsendeten und den ersten Außenbordeinsatz durchführten. Beim Wettlauf zum Mond scheiterten sie jedoch, weil sie, anders als ihre Konkurrenten, nicht kontinuierlich auf das Ziel »bemannte Landung auf dem Erdtrabanten« hinarbeiteten.

Ein Kapitel widmet der Autor zudem Wernher von Braun. Dieser deutsche Ingenieur machte mit dem Wissen, das er sich als Raketenkonstrukteur in Nazideutschland angeeignet hatte, die Reise zum Mond erst möglich. Kulke schildert, wie von Braun sich nach dem Krieg den Amerikanern anbot und mit welchem Selbstbewusstsein er seine Karriere in den USA fortsetzte – bis hin zum Bau der mächtigen Saturn-Raketen, die schließlich die Apollo-Astronauten in Richtung Erdbegleiter beförderten.

Mit seinem Buch ist Kulke ein spannendes Werk gelungen, das weniger die erste bemannte Mondlandung thematisiert als vielmehr die vielen vorherigen Geschehnisse in den 1950er und 1960er Jahren in den Blick nimmt. Doch diese Meilensteine waren mindestens ebenso wichtig wie die publikumsträchtige Mission zur Mondoberfläche. Ein Buch für Technikfans und Raumfahrtenthusiasten.

Der Rezensent Thorsten Naeser ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

TECHNIK
SCHLAGLICHT AUF DIE ENERGIEWENDE

Ein kurzer Abriss der Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten.

Der Physiker Thomas Unnerstall war zunächst im Umweltministerium Baden-Württemberg und dann mehr als 20 Jahre lang in der Energiewirtschaft tätig. In diesem Werk untersucht er, wie sich das angestrebte Klimaschutzziel für Deutschland im Jahr 2050 (CO_2-Reduktion um 80 Prozent gegenüber 1990) erreichen lässt – ohne Verbote, Strukturbrüche und Komfortverlust. Dabei thematisiert er etwa die Energieversorgungssicherheit, den Kohleausstieg und CO_2-Emissionen durch Verkehr und Gebäudeheizungen. Sein Fazit: Die Energiewende ist machbar. Es gebe zwar große Herausforderungen, jedoch auch Lösungen mit heute schon verfügbarem Knowhow.

Eine notwendige Technologie, so Unnerstall, sei das CO_2-neutrale Verfahren Power-to-Gas (PTG). Dabei wird mit Hilfe überschüssigen Stroms aus regenerativen Quellen zunächst Wasserstoff aus Wasser und schließlich (durch Aufnahme von CO_2) Methan erzeugt, das sich speichern und bei Bedarf wieder in elektrische Energie umwandeln lässt. Das könnte der dringend benötigte Speicher für regenerative Energie sein. Allerdings drängen sich bei



Thomas Unnerstall
ENERGIEWENDE VERSTEHEN
Die Zukunft von Autoverkehr, Heizen und Strompreisen
Springer, Berlin und Heidelberg 2018
179 S., € 9,99

der Lektüre Fragen auf, die das Buch nicht beantwortet: Ist der Ausstieg aus der Braunkohleverstromung angesichts der politischen Verwerfungen so schnell möglich wie von Unnerstall angenommen? Wird in der Kürze der Zeit der notwendige Markt für PTG entstehen? Werden die Autokäufer ab Mitte der 2020er Jahre wirklich massenhaft auf E-Autos umsteigen?

Das Werk lässt sich dennoch allen Leser empfehlen, die in knapper Form die aktuellen Herausforderungen und mögliche Lösungsansätze der Energiewende kennen lernen wollen.

Der Rezensent Jürgen Scharberth ist Geophysiker und Technischer Redakteur in Braunschweig.

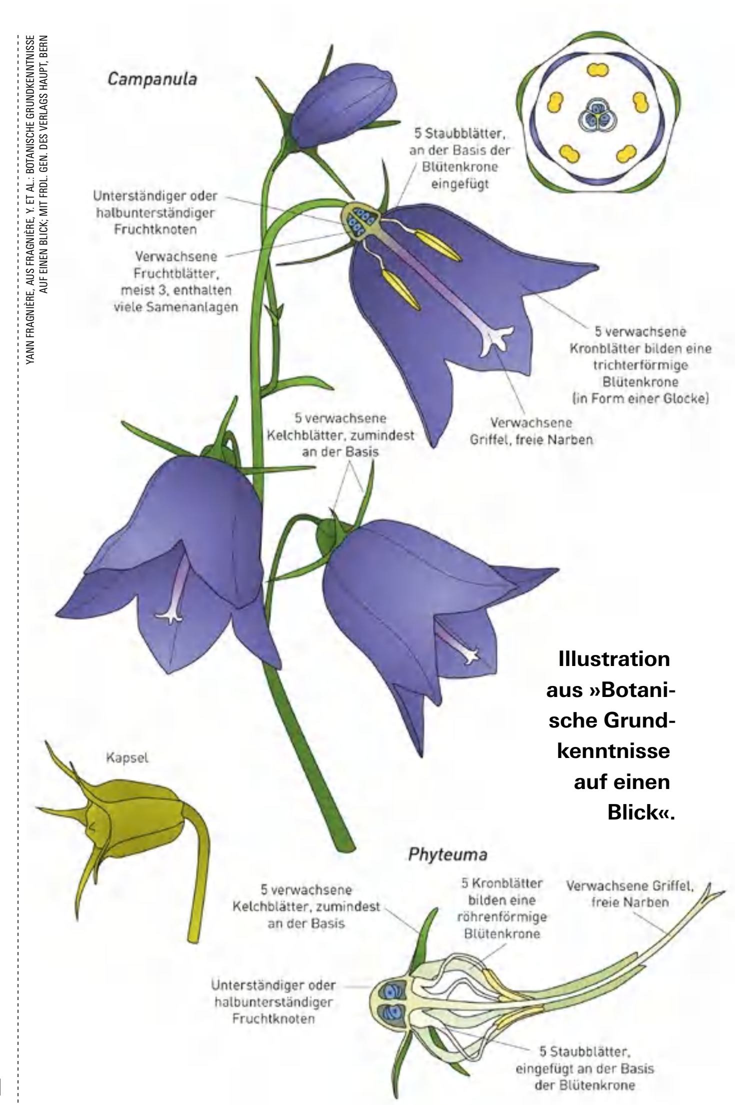
BOTANIK
DIE PFLANZEN IN MITTELEUROPA

Wer sich einen Überblick über die wichtigsten Gewächse Mitteleuropas verschaffen möchte, ist mit diesem Bildband bestens bedient.

Sie haben genug vom grauen Winter und freuen sich darauf, im Frühling endlich wieder die Natur zu erkunden? Egal, ob Sie sich Botanikkenntnisse überhaupt erst aneignen oder sie lediglich etwas aufpolieren möchten: Dieser umfangreiche Bildband gibt sowohl Anfängern als auch fortgeschrittenen Hobby-Pflanzenkundlern das entsprechende Rüstzeug an die Hand. Entstanden als Gemeinschaftsarbeit von Mitarbeitern des Botanischen Gartens Freiburg im Üechtland, bietet das Buch einen guten Überblick über 40 der häufigsten Pflanzenfamilien Mitteleuropas. Wissenschaftlich auf dem neuesten Stand, kommt es sehr strukturiert und didaktisch durchdacht daher. Der Band ist jedoch kein Bestimmungsschlüssel – wer einen solchen sucht, sollte lieber auf die entsprechenden Standardwerke zurückgreifen.

Im kompakt gehaltenen Einführungsteil skizzieren die Autoren unter anderem die Evolution der Pflanzen und erläutern anschließend, wie sich die botanischen Klassifizierungssysteme über die Zeit entwickelt haben. Ansprechende Fotos, Abbildungen, Schemata und Piktogramme ziehen sich wie ein roter Faden durch das Buch. Akkurat und detailliert verdeutlichen beispielsweise Stammbäume oder Verweise auf Pflanzenmerkmale wichtige Aspekte des Textes. Hier zeigt sich die didaktische Erfahrung der Autoren. Der Einführungsteil schließt mit einem kurzen Überblick darüber, was Pflanzenfamilien allgemein ausmacht und woran man sie erkennen kann.

Der wesentlich umfangreichere Hauptteil besteht aus meist sechsseitigen Porträts aller 40 wichtigsten mitteleuropäischen Pflanzenfamilien. Anders als viele Bestimmungshilfen kommen die Autoren mit einem stark eingedampften Fachvokabular aus. Dafür rücken sie das Visuelle erkennbar in den Fokus. Die wunderschönen detailreichen Fotografien sind zum größten Teil in Eigenregie entstanden und auf fast jeder Seite zu finden.



YANN FRAGNIÈRE, AUS FRAGNIÈRE, Y. ET AL.: BOTANISCHE GRUNDKENNTNISSE AUF EINEN BLICK; MIT FRDL. GEN. DES VERLAGS HAUPT, BERN

Illustration aus »Botanische Grundkenntnisse auf einen Blick«.



Yann Fragnière, Nicolas Ruch, Evelyne und Gregor Kozlowski
BOTANISCHE GRUNDKENNTNISSE AUF EINEN BLICK
40 mitteleuropäische Pflanzenfamilien
Haupt, Bern 2018
319 S., € 34,–

Der Aufbau der »Familienporträts« folgt einem immer gleichen Muster. Die erste Doppelseite stellt die jeweilige Familie in Wort und Bild vor. Dabei treten die Gemeinsamkeiten zentraler Gattungen hervor, und es zeigt sich, inwiefern sie für Mensch und Natur bedeutsam sind. Auf den folgenden beiden Seiten geht es um taxonomische, ökologische und biogeografische Eckpunkte, aber auch um morphologische Hauptmerkmale der wichtigsten Gattungen. Weitere zentrale Eigenschaften – etwa Blütenformel, Fruchttyp, Bestäubungs- und

UNSPLASH / FANNING TSENG (https://unsplash.com/photos/E44CYHqUI1c); BEARBEITUNG SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Verbreitungstyp – werden ebenfalls aufgeführt. Abschließend präsentieren die Autoren eine Auswahl wichtiger Arten, je nach Größe der Familie auf bis zu vier Seiten.

Ein umfassendes Glossar mit Fachtermini und ein Register sowohl mit lateinischen als auch deutschen taxonomischen Bezeichnungen komplettieren den schönen Bildband. Wer ein nicht zu technisch geratenes Einsteigerwerk sucht, das eher auf Bilder denn auf langwierige Erklärungen setzt, ist mit dem Werk bestens bedient.

Der Rezensent Arne Baudach ist promovierter Biologe in Friedberg (Hessen).

LANDWIRTSCHAFT
PLÄDOYER FÜR DAS TIERWOHL

Die frühere Tierschutzbeauftragte Cornelie Jäger spricht sich für eine landwirtschaftliche Viehzucht aus – aber für eine deutlich tierfreundlichere, als sie derzeit praktiziert wird.

Landwirte, Umwelt- und Tierschutzorganisationen sowie kritische Verbraucher prangern seit Jahrzehnten die konventionelle Nutztierhaltung an. Bestürzende Bilder aus Stätten der Massentierhaltung sorgen immer wieder für berechtigte Empörung. Der enorm gewachsene Verzehr von Eiern, Milch und Fleisch in den entwickelten Ländern, die Ausbreitung von Tierfutter-Plantagen in den ärmeren Ländern auf Kosten der dortigen Bevölkerung und Umwelt sowie das Tierwohl stehen im Fokus dieses Buchs. Dessen Autorin Cornelie Jäger, frühere Landesbeauftragte für den Tierschutz Baden-Württemberg, befasst sich mit ethischen, umweltpolitischen und wirtschaftlichen Problemen, die mit der massenhaften Nutztierhaltung verbunden sind. Sie plädiert für landwirtschaftliche Viehzucht, aber deutlich stärker im Sinne des Tierwohls, als es derzeit der Fall ist, und unter veränderten wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen für die Erzeuger.

Warum das Suppenhuhn im Titel? Am Beispiel der Legehennen in Deutschland macht die Autorin das Problem deutlich. Ein Legehuhn produziert in einer so genannten Legeperiode von rund einem Jahr mehr als 300 Eier, die eine Gesamtmasse von etwa 20 Kilogramm haben und damit das Zehnfache auf die Waage bringen wie der Vogel selbst. Dieser unglaubliche Stoffdurchsatz und die Haltungsbedingungen bleiben nicht ohne Folgen: Sie gehen auf Kosten der Knochensubstanz, führen bei zahllosen Tieren zu tödlichen Stoffwechselerkrankungen und Organkomplikationen ebenso wie zu stressbedingten Verhaltensstörungen wie Federpicken und Kannibalismus. Und was erbringt die »ausgediente« Legehenne beim Schlachter? 19 Cent pro Tier und weniger. Als Suppenhuhn wird sie uns im Handel zwischen drei und vier Euro offeriert.

Jäger beleuchtet aus historischer Perspektive sowohl den agrarischen Strukturwandel in Deutschland als auch die Veränderungen in der Tier-Mensch-Beziehung. Um belastbare Lösungsvorschläge zu finden und tragfähige Zukunftsszenarien für landwirtschaftliche Tierhaltung zu entwickeln, plädiert sie eingangs dafür, tiergerechte Haltung und Umweltverträglichkeit, Ethik, Wirtschaftlichkeit und Technik gemeinsam zu betrachten. Sie thematisiert die Versorgung von Menschen und Tieren, die Folgen unterschiedlicher Haltungsbedingungen für die Tiere, die Wechselbeziehungen mit der Umwelt und das Klima. Auch mit dem Einfluss von Konsumenten und Handel befasst sie sich.



Cornelie Jäger
DIE SACHE MIT DEM SUPPENHUHN
Ulmer, Stuttgart 2018
335 S., € 18,–

Die Autorin fordert den Ausbau einer multifunktionalen Tierhaltung und eine Entlastung der Stoffkreisläufe. Darunter versteht sie unter anderem einen zügig umzusetzenden, weit gehenden Verzicht auf synthetische Stickstoffdünger, das Einbeziehen von Leguminosen in die Fruchtfolge und die Einsaat von Klee-Gras-Gemenge als Weidegrundlage. Jäger schlägt vor,

19 Cent für eine »ausgediente« Legehenne

Pflanzenreste in Biogasanlagen zu verstromen und die organische Bodensubstanz mit einer Kombination aus Gülle und Biokohle aus Agroforstprojekten zu verbessern – auch, um die CO_2-Speicherkapazität des Bodens zu erhöhen. Sie plädiert gegen Importfuttermittel, etwa Soja aus Übersee, und für eine stärker grundfutterbetonte Mast, das heißt für einen geringeren Anteil leistungssteigernden Futters. Im Hinblick auf die Rinderhaltung spricht sie sich für Zweinutzungsrassen aus (Tiere, die Milch und Fleisch liefern). Die Tierbestände seien so umzuorganisieren, dass nicht mehr als maximal 1,6 Großvieheinheiten pro Hektar gehalten werden. Es seien ferner Prioritäten bei der Flächennutzung festzulegen. Eine extensive Flächenbewirtschaftung und das Wiedervernässen agrarisch genutzter Moore seien anzustreben.

Um all das durchzusetzen, empfiehlt Jäger die Einführung eines »Bonuspunktesystems für Multifunktionalität«. Darunter versteht sie Belohnungspunkte etwa dafür, den Boden durch Eintrag von Festmist oder Leguminosenaussaat zu verbessern; Weide- und Grünlandnutzung zu extensivieren; die Nahrungskonkurrenz zwischen Mensch und Tier zu entschärfen (weniger als die Hälfte der weltweiten Getreideproduktion dient der menschlichen Ernäh-

rung); Ackerflächen in Grünland (rück-)umzuwandeln; Moorböden wieder zu vernässen; organische Düngemittel einzusetzen; auf Importfuttermittel zu verzichten; die Zahl der Tiere pro Flächeneinheit zu begrenzen und vieles mehr. Dieses Punktesystem solle von spezifischen Regeln und Abgaben ergänzt werden, etwa für einen Stickstoffüberschuss.

Die Tierhaltung solle, so die Autorin, fürsorglicher und tiergerechter werden. Beispielsweise, indem die Umgebung an die Bedürfnisse der Tiere angepasst werde, und nicht umgekehrt. Hier verweist Jäger auf die Selbstauflagen der Brancheninitiative »Tierwohl«, eine von Produzenten und Discountern gestartete, freilich nicht unumstrittene Initiative. All dies setze eine tierwohlorientierte Haltung der Konsumenten sowie eine problemorientierte EU-weite Wirtschaftspolitik voraus.

Das lesenswerte Buch hätte noch deutlich gewonnen, hätten Verlag und Autorin nicht auf Abbildungen, zusammenfassende Infoboxen und grafische Gliederungshilfen verzichtet. Auch macht es sich die Autorin in Bereichen wie Tier- und Weidemanagement, landwirtschaftliche Bodenkunde und Pflanzenproduktion, Hydrologie und Landschaftsökologie manchmal zu einfach. Wie soll etwa eine Begrenzung der Anzahl von Weidetieren

pro Hektar gelingen, wenn seit Jahren schon keine Flächenbindung (Kopplung von Fläche und Tieranzahl) mehr existiert und politisch auch nicht gewollt ist? Zudem stören Redundanzen zwischen den einzelnen Kapiteln, etwa in den häufig wiederkehrenden Plädoyers.

Ein umfangreiches Literatur-, Abkürzungs- und Stichwortverzeichnis, zahlreiche Endnoten sowie Rechtstexte aus Deutschland, Österreich und der Schweiz beschließen das Werk, das die Komplexität des Themas zwar nicht auflöst, aber wichtige Gesichtspunkte herausarbeitet und seriöse Informationen liefert.

Der Rezensent Manfred Feyk ist Agrarwissenschaftler, Geoinformatiker und Journalist (FJS).

GESCHICHTE
DER HEXEREI ANGEKLAGT

Der Astronom Johannes Kepler verteidigte seine Mutter in einem Hexenprozess und rettete sie vor Folter und Scheiterhaufen. Dieses Buch beleuchtet seine Zeit.

Es waren stürmische Zeiten, in denen Johannes Kepler (1571–1630) auf der Höhe seines Schaffens angelangt war. Als er an seinem wichtigsten naturwissenschaftlichen Werk arbeitete, der »Weltharmonik«, ging es für seine Mutter um Leben und Tod. Katharina Kepler wurde 1615 der Hexerei angeklagt, und ihr Sohn eilte ihr zur Hilfe, um sie im anstehenden Prozess zu verteidigen.

Jene tragischen Ereignisse bilden die Rahmenhandlung dieses Buchs. Die Historikerin Ulinka Rublack, die an der University of Cambridge arbeitet, legt darin weit mehr vor als die Abhandlung eines jener zahllosen Hexenprozesse, die damals ganz Europa erfassten und zwischen 40000 und 50000 Frauen und Männer das Leben kosteten. Allein die Tatsache, dass ein hoch angesehener Mathematiker und Astronom seine Mutter vor Folter und Verbrennung beschützen musste, bietet schon mehr als genug Stoff für das äußerst beeindruckende Sachbuch. Darüber hinaus erfahren die Leser viel über den tief verwurzelten christlichen Glauben von Keplers Zeitgenossen, ihre ständige Angst vor dem Teufel sowie den Hexen und okkulten Einflüssen, die angeblich von ihm ausgingen. Diese hochexplosive Mischung aus religiösen Überzeugungen und Aberglauben bindet Rublack packend in die Handlung ein. Fast liest sich ihr Werk wie ein Krimi.

Viele Jahre lang sah sich Keplers Mutter Katharina den Verleumdungen ihrer Nachbarn ausgesetzt, bis sie schließlich 1615 der Hexerei angeklagt wurde. Der Prozess und seine Vorgeschichte sind sehr gut dokumentiert. Daraus geht deutlich hervor, dass ein Hexenprozess durchaus eine komplizierte juristische Angelegenheit war, lange dauern konnte und nicht zwangsläufig mit der Todesstrafe enden musste. Die genaue Überlieferung der Ereignisse ist zu einem großen Teil den persönlichen Aufzeichnungen von Johannes Kepler zu verdanken, der seine Mutter geradezu brillant im Hauptprozess 1620 verteidigte. Er unterbrach seine Arbeit als Naturforscher und reiste 1617 von Linz nach Württemberg, um seiner Mutter beizustehen.

Rublack versteht es hervorragend, die historischen Ereignisse einzubetten in zahlreiche Informationen darüber, wie die Menschen damals dachten und nach welchen Kriterien sie handelten. Tief verwurzelt war der Glaube daran, dass der Teufel vor allem schwache Frauen zu »seinen Hexen« machte. Katharinas Nachbarn schworen auf die Bibel, dass die alte gebrechliche Dame durch verschlossene Türen gegangen sei oder ihnen mit Kräutertränken geschadet habe.

Selbst Kepler, der tief im christlichen Glauben wurzelte, war fasziniert vom Okkultismus, glaubte allerdings wohl nicht an Hexerei. Er erstellte zahllose Horoskope für hochrangige Würdenträger; die Astrologie galt damals noch als seriöse Wissenschaft. Demgegenüber stehen seine akribischen Berechnungen zu den planetaren Umlaufbahnen um die Sonne und weitere bahnbrechende Erkenntnisse zur Natur unseres Universums. Der Astronom gehörte zu den ersten Naturforschern, die dem noch jungen und heftig umstrittenen heliozentrischen Weltbild des Nikolaus Kopernikus (1473–1543) anhingen. Keplers Denkweise spiegelt sehr gut die damalige Gesellschaft wider, die stark zwischen Aberglaube und den rasant wachsenden wissenschaftlichen Erkenntnissen schwankte und sich gerade eben erst aufgemacht hatte, in die vernunftgeleitete Moderne zu reisen.

Kepler gelang es, seine Mutter vor Folter und Scheiterhaufen zu bewahren. Das war ein juristisches Meisterstück, denn die »Indizienlage« gegen seine Mutter war erdrückend. Doch der Astronom konnte sich sehr gut in die Ankläger hineinversetzen und schaffte es, ihre Anschuldigungen überzeugend zu entkräften. Auf seine Verteidigungsstrategien geht Rublack in ihrem sehr empfehlenswerten Buch ein.

Die Autorin vermittelt ihren Lesern ein Gefühl für die Denkweisen und sozialen Umstände im Mitteleuropa des 17. Jahrhunderts. Sie zeigt, wie in dem damaligen Spannungsverhältnis zwischen neuen Erkenntnissen und tief verwurzeltem Aberglauben allmählich die empirische Wissenschaft entstand.

Der Rezensent Thorsten Naeser ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.



Ulinka Rublack
DER ASTRONOM UND DIE HEXE
Johannes Kepler und seine Zeit
Aus dem Englischen von Hainer Kober
Klett-Cotta, Stuttgart 2018
409 S., € 26,–



Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile als Abonnent

Exklusive Extras und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

WACHTBERG 22. 3. 2019

Leserexkursion: **Weltraumbeobachtungsradar TIRA**

FRAUNHOFER FHR

Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**

22. 3. 2019	Leserexkursion zum Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR und seinem Weltraumbeobachtungsradar TIRA, Wachtberg
3. 6. 2019	Redaktionsbesuch bei **Spektrum**.de, Heidelberg
5. 7. 2019	Leserexkursion zu EUMETSAT, Darmstadt

Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von **Partnern** zum **Vorteilspreis**

bis 22. 3. 2019	Live-Fotoreportage »Grenzenloses Skandinavien«, diverse Städte in der Schweiz
15. 3. 2019	**Spektrum** LIVE Veranstaltung »Pasta, Pomodore, Parmigiano: Physik pur«, Frankfurt a. M.
12.–14. 4. 2019	Symposium Kortizes »Hirn im Glück«, Nürnberg
10. 5. 2019	Schreibwerkstatt bei **Spektrum** der Wissenschaft, Heidelberg
23. 5. 2019	Lesung von Steve Ayan »Ich und andere Irrtümer: Die Psychologie der Selbsterkenntnis«, Stuttgart
25.–28. 6. 2019	Konferenz »The Science of Consciousness (TSC) 2019«, Interlaken

Digitales Produkt zum kostenlosen Download

Download des Monats im März: **Spektrum** KOMPAKT »Vulkane« und weitere Vorteile
Englischkurs von Gymglish zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Leserreisen

Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours
5-tägige Spektrum-Leserreise nach Bern »Auf den Spuren von Albert Einstein«, durchgeführt von Wittmann Travel

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus

LESERBRIEFE

ZU SCHMALER BLICKWINKEL

Der Psychologe Thomas Suddendorf ging der Frage nach, was die Besonderheit der Menschen im Tierreich ausmacht. (»Schlaue Köpfe«, **Spektrum** Januar 2019, S. 20)

Martin Frettlöh, Siegen: Danke für den interessanten Artikel, den ich sehr genossen habe. Zwei Dinge finde ich jedoch nicht völlig schlüssig. Professor Suddendorf schreibt, dass sich die Abwesenheit einer Fähigkeit schwierig bis gar nicht beweisen lässt. Zugleich behauptet er jedoch ohne jeden Beweis, dass die Fähigkeit zum Ausdenken völlig fiktiver Geschichten nur beim Menschen und sonst bei keinem anderen Lebewesen vorhanden ist. Dabei gibt es Hinweise, dass sie bei Tieren zumindest in Ansätzen besteht. Ich denke zum Beispiel an eine träumende junge Katze, die niemals in ihrem Leben ihre Wohnung verlassen hat. Die Bewegung ihrer Pfoten und ihres Gesichts legen nahe, dass sie vermutlich davon träumt, zu jagen. Aber wenn sie fiktive Situationen im Traum durchgeht, warum dann nicht auch, während sie wach ist, unbemerkt von uns?

Der zweite Aspekt, den ich fraglich finde, betrifft die menschliche Sprache. Wir Menschen brüsten uns gerne mit dieser Errungenschaft, vergessen jedoch, dass die verbale Kommunikation bei Weitem nicht das einzige oder beste Mittel zur Verständigung ist. Bienen brauchen keinen Kehlkopf, um sich über Flugrouten auszutauschen, Bakterien nutzen Quorum Sensing. Zudem ist die Sprache alles andere als präzise. Bauen Sie mal ein Legomodell ohne bebilderte Beschreibung nur nach Textanweisung zusammen. Lesen Sie eine Textinterpretation in einer Klassenarbeit aus der 10. Klasse, oder reden Sie mit fünf Leuten über einen Zeitungsartikel. Unsere Sprache ist ein gutes Kommunikationsmittel, besonders ausgereift ist sie allerdings nicht. Sonst gäbe es weniger Leserbriefe in **Spektrum** der Wissenschaft.

Antwort des Autors Thomas Suddendorf:
Schon Darwin brachte vor, dass manche Tiere träumen und kommunizieren, und es stimmt natürlich, dass die Sprache oft nicht präzise ist. Diese Beobachtungen widersprechen allerdings nicht meiner Analyse. Vielleicht habe ich mich in dem kurzen Artikel nicht klar genug ausgedrückt (die Sprache halt) und verweise deshalb auf mein ausführliches Buch »Der Unterschied«, in dem ich die häufigsten als einzigartig menschlich angenommenen Eigenschaften untersuche (und auch Bienentanz und verschiedene Indizien für Vorstellungskraft bespreche). Nicht Vorstellungsvermögen und Kommunikation per se, sondern (1.) das Entwerfen verschachtelter Szenarien, durch das wir uns Situationsalternativen ausmalen und in größere Zusammenhänge setzen können, und (2.) unser Verbindungsdrang, also das Bedürfnis, Gedanken mit anderen auszutauschen und unseren Geist mit dem anderer zu verknüpfen, erwiesen sich als kritischer Unterschied in allen Bereichen. Dies sind Hypothesen, die aus der derzeitigen Beweislage folgen – und die wir nun, im Geiste der wissenschaftlichen Methode, versuchen können zu widerlegen.

Eduard Kirschmann, Hannover: Thomas Suddendorf schreibt: »Unsere dominierende Stellung beruht wohl kaum auf körperlichen Fähigkeiten. Andere Tiere sind stärker, schneller und mit schärferen Sinnesorganen ausgestattet.« Indem er den Körper vorschnell beiseiteschiebt, verzichtet Suddendorf auf entscheidende Hinweise, wonach er im Gehirn suchen muss. Außerdem ist die Behauptung falsch, andere Tiere seien schneller. Sie können nur schneller laufen. Hingegen benutzen Menschen lediglich zwei von ihren vier Extremitäten zum Laufen. Die Frage ist, was die anderen beiden tun und wie wir dabei im Vergleich zu Tieren abschneiden.

Wie schnell ein Tier laufen kann, hängt von der maximal erreichten Relativgeschwindigkeit zwischen Rumpf und Pfoten ab. Sie beträgt bei Geparden, den schnellsten Landtieren, etwa 120 Kilometer pro Stunde. Der entsprechende Wert für die menschliche Wurfhand (beim Baseball) liegt jedoch bei knapp 170 Kilometer pro Stunde. Dass dies einen hoch spezialisierten Körperbau voraussetzt, liegt auf der Hand.

Meine Empfehlung für die Suche nach der Sonderstellung des Menschen lautet daher, bei seiner körperlichen Spezialisierung anzufangen und nachzuforschen, welche Gehirnleistungen zu den betreffenden körperlichen Anpassungen gehören.

Als Suddendorf doch noch auf das Werfen zu sprechen kommt, legt er den Schwerpunkt auf die kulturelle Entwicklung von Distanzwaffen und übersieht die enormen geistigen Anforderungen des gezielten Werfens an sich. Diese bieten eine alternative Erklärung, warum Menschen so gut im Üben sind. Allerdings spielt dabei Nachahmung eine untergeordnete Rolle. Beim Werfen ist die Lernphase länger als beim aufrechten Gang oder beim Sprechen – folgt aber anscheinend ebenfalls einem angeborenen Lernprogramm.

Antwort des Autors Thomas Suddendorf:
Schneller ist nicht immer besser, und es ist nicht offensichtlich, auf welche Weise eine größere Schnelligkeit besondere Merkmale wie unsere Fähigkeit, gezielt zu üben

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

oder Geschichten zu erzählen, erklären könnte. Die schnellsten Bewegungen machen übrigens Ameisen (*Mystrium camillae*, siehe https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.181447), und am schnellsten bewegen sich Falken fort. Die Aussage, dass andere Tiere stärker und schneller sind als wir, sollte nur verdeutlichen, dass unsere Macht primär auf unserem Geist beruht.

ECHTE MANDELKNOLLEN

Vor neun Jahren gelang es Programmierern, das berühmte Apfelmännchen als räumliches Gebilde darzustellen. (»Mandelbrot dreidimensional«, **Spektrum** April 2010, S. 56)

Heinrich Waldmann, Berlin: Dreidimensionale Darstellungen der Mandelbrotmenge, die einst in **Spektrum** abgebildet waren und seit Jahren als so genannte Mandelknollen im Internet kursieren, beruhen auf Näherungsverfahren und sind deshalb nicht ganz echt. Ich habe eine Möglichkeit gefunden, die Mandelknolle exakt abzubilden. Das obere Bild (rechts) zeigt sie in ihrer ganzen Schönheit.

Im Bild darunter ist eine extreme Ausschnittsvergrößerung der »Spitze« zu sehen, die am linken Rand der Mandelknolle auf halber Höhe am weitesten herausragt.

Wie beim Apfelmännchen ähnelt diese Unterstruktur der Gesamtstruktur. Im Vergleich zu den bisherigen Internetbildern der Mandelknolle ist hier deutlich zu sehen, dass ihr Volumen wohl nicht zusammenhängend und vor allem die Oberfläche ganz und gar nicht glatt ist!



HEINRICH WALDMANN, BERLIN

Zoomt man in eine dreidimensionale Darstellung der Mandelknolle (oben) hinein, begegnet man wieder sehr ähnlichen Strukturen (unten).



HEINRICH WALDMANN, BERLIN

GLETSCHEREIS IM MEER

H. Joachim Schlichting erklärte in seiner Kolumne, warum Eisberge beim Schmelzen den Meeresspiegel erhöhen. (»Schmelzende Eisberge«, **Spektrum** November 2018, S. 80)

Ulrich Foelsche, Graz: Der Artikel räumt mit einem hartnäckigen populären Irrtum auf, der meist noch mit größter Überzeugung weiterverbreitet wird – sogar in Schul- und Lehrbüchern.

Die Erklärung, warum Eisberge aus Süßwasser bestehen, ist hier dennoch nicht ganz richtig. Sie stimmt zwar für Meereis in der Arktis, das tatsächlich durch das Gefrieren von Meerwasser gebildet wird.

Die Eisberge auf der Südhalbkugel entstehen allerdings nicht auf diese Weise, sondern durch das »Kalben« (Abbrechen) von Gletschern. Da das Gletschereis aus komprimiertem Schnee besteht, ist der Salzgehalt von vornherein minimal.

Tafeleisberge, die von den großen Eisschelfen der Antarktis abbrechen, können zwar an ihrer Unterseite einen gewissen Anteil an angefrorenem Meerwasser aufweisen. Dieser ist aber nur von untergeordneter Bedeutung.

ERRATUM

»Kettenwurzeln«, **Spektrum** Februar 2019, S. 68

Die Kettenwurzel unten rechts auf S. 69 hat den Wert 4, nicht 6. Außerdem ist im Kasten »Näherung des Kreisumfangs durch einbeschriebene Vielecke« auf S. 70 an zwei Stellen der Strich des Wurzelzeichens zu lang geraten. Dort muss es $\sqrt{2}/2$ heißen statt $\sqrt{2/2}$. Wir danken unserem Leser Thomas Schirmer aus Darmstadt für den wichtigen Hinweis.

Das Ende ist der Anfang

Das Leben geht weiter.
Eine Kurzgeschichte von Mike Adamson

Der Mord ist aus dem menschlichen Zusammenleben fast verschwunden – nicht etwa wegen höherer Moralstandards oder spiritueller Veredelung, sondern einfach deshalb, weil es nicht mehr zutrifft, dass Tote für immer schweigen.

Der Nachmittag strahlt hell und warm; auf den Terrassen der glitzernden vertikalen Architektur von Neu-Johannesburg drängen sich die Passanten, und Roboter gehen ihrer Arbeit nach. Ich flaniere im Sonnenschein, genieße die vom Meer hereinwehende Brise, und der Friede scheint ungetrübt. An meinen ursprünglichen Namen erinnere ich mich kaum – ich müsste meine Daten checken, aber im Moment ist das ein unwichtiges Detail. Ich muss jemanden treffen, bin mir meiner Gefühle jedoch nicht sicher. Werde ich mich bei dieser Person bedanken oder ihr mit der hydraulischen Kraft, die sich in meinen schlanken, ebenholzschwarzen Armen verbirgt, den Kopf abreißen?

Gegen Ende des 23. Jahrhunderts hat sich die Menschheit über die Sterne ausgebreitet. Unsere Schiffe haben mehr als 100 neue Welten besucht, und die gute alte Erde schüttelt die Verheerungen ihrer Vergangenheit ab. Die Übervölkerung ist kein Problem mehr, die Technik hat so manchen Mangel beseitigt. Zu den umwälzenden Erfindungen unserer wie neugeborenen Spezies zählen die vielen Strategien, durch die der Tod aufgehört hat, unumstößlich zu sein.

Mich ereilte der Tod in einem der Überschallzüge, die mit magnetischem Induktionsantrieb durch evakuierte Röhren in alle Welt rasen. Bei einem Unfall werden die Passagiere durch zahlreiche Schutzmechanismen gerettet, aber ich hatte das Pech, einer Stütze aus Kunststoffbeton und verstärkten Legierungen im Weg zu stehen, die unter der Masse des entgegenkommenden Kairo-Neu-Jo'burg-Expresszugs kollabierte. Nachher sagte man mir, es sei sehr schnell gegangen, ich hätte nicht leiden müssen. Ein schneller, sauberer Abgang.

Erst später fand ich heraus, dass manches unklar war. Mein Körper war nicht völlig zerstört worden, man hätte lebenswichtige Systeme stilllegen und reparieren können. In manchen Kreisen wurden Zweifel laut, Überprüfungen versprochen, aber ich hörte nichts mehr – bis mir ein beteiligter Arzt im Vertrauen mitteilte, dass der leitende Medizintechniker, anstatt die möglichen Alternativen weiterzuverfolgen, die sofortige Cyber-Inkarnation verfügt hatte.

Cyber-Inkarnation ist die übliche legal zulässige Notlösung, bei der man die Persönlichkeit von der chemischen Matrix des Gehirns herunterlädt und speichert, um sie dann in einer der verfügbaren Prothesen zu reanimieren – je nach Wunsch des Betreffenden als Cyborg, Android oder Festkörperhologramm. Natürlich können sich nur die Reichen einen eigenen neuen Körper leisten; wir Übrigen müssen uns mit einem Timesharing-Arrangement begnügen. Das ist zwar manchmal unbequem, hat aber auch gewisse Vorteile.

Gestern war ich ein tollkühner Surfer, der auf turmhohen Wellen landeinwärts ritt. Am Tag davor schwelgte ich in musikalischen Fantasien, welche mir die Programmierung meines zeitweiligen Hologramms ermöglichte; ich hatte nie zuvor Klavier gespielt, will es aber gewiss wieder tun. Heute stecke ich in einem Körper, den ich vor meinem verfrühten Hinscheiden beneidet hätte: lang und schwarz und eindrucksvoll in fließende Blautöne gehüllt. Die Schöne zieht die Blicke auf sich, und ich genieße die Tatsache, dass niemand weiß, wer ich bin. Nur die Toten erkennen einander; wir spüren die Trugbilder, zu denen wir geworden sind, und tauschen ein wissendes Lächeln, denn wir bilden jetzt eine Elite.

Da: Der Mann, hinter dem ich her bin, nimmt in dem Freiluftcafé vor der Glasfront eines aufragenden Hotels Platz, im kühlen Schatten der Landeplätze hoch oben. Um diese Zeit macht er Mittagspause.

Ich schreite selbstbewusst hinüber, der Schall meiner Absätze mischt sich mit dem Geräusch der Passanten, bis ich in den Sitz ihm gegenüber gleite und stumm seinen Blick fixiere. Er ist nicht unattraktiv: dichtes blondes Haar über einem markigen Schädel mit energischem Kinn. Die Verjüngung ist in der Tat hervorragend gelungen; sie spult seine 120 Jahre auf ansehnliche 30 zurück, und ich merke, dass er meine Hülle aus Fleisch, Metall und Kunststoff anerkennend mustert. »Doktor Rensburg«, stelle ich zur Eröffnung fest.

Ein Robokellner schwebt in der Nähe. Rensburg bestellt leise Tee – für zwei.

»Sie sind mir offenbar in einem Punkt voraus«, murmelt er. »Hat man das nicht früher so ausgedrückt?«

Ich reiche ihm eine wohlgeformte Hand, bevor ich lächle und noch einmal die Daten checke – Onika, ja, so heiße ich jetzt. »Onika Kabila.«

Er runzelt die Stirn, kann damit nichts anfangen. »Kennen wir uns?« Jetzt grinst er schelmisch. »Ich kann doch jemanden, der so bezaubernd aussieht wie Sie, unmöglich vergessen haben.«

Ich schenke ihm das Lächeln, das seine Worte verdienen. Dann lehne ich mich zurück und starre aufs Meer, während uns die Drohne mit edlem Porzellan und einer Glaskanne bedient. Als wir die Tassen mit duftendem Tee

Heute stecke ich in einem Körper, den ich vor meinem verfrühten Hinscheiden beneidet hätte: lang und schwarz und eindrucksvoll in fließendes Blau gehüllt

zum Mund führen, fasse ich einen Entschluss: Ich werde ihn nicht töten.

Stattdessen hebe ich meine Tasse zum Gruß. »Danke«, flüstere ich, und mein Lächeln ist auf einmal nicht künstlich. »Sie hätten mich zurück in meinen lebendigen Körper verpflanzen können, aber Sie haben mich eigenmächtig umgetopft. Wie ich weiß, erhalten Sie für jeden Patienten, den Sie in einen Ersatzkörper schicken, eine finanzielle Zuwendung von den Kybernetik-Firmen, damit der Android-Industrie nie die Aufträge ausgehen, und lange Zeit wollte ich Sie dafür umbringen.«

Er macht große Augen, und meine elektronischen Sinne nehmen beschleunigten Puls wahr, geweitete Pupillen und ein Dutzend weitere Anzeichen. »Aber man würde Sie nur in einen weiteren Festspeicher verpflanzen – und ich bin nicht so hasserfüllt, dass ich Ihr Gehirn völlig zerstöre, um das zu verhindern.«

Mein Blick fixiert ihn scharf, während ihm vor der Ungewissheit des Augenblicks schwindelt. »Aber wissen Sie was? Ich mag, wo ich jetzt bin. Es ist nicht so anders – und in mancher Hinsicht sogar besser.« Ich nehme noch einen Schluck, erhebe mich, beuge mich über den Tisch und sage ihm leise ins Ohr: »Also wünsche ich Ihnen Glück und langes Leben, hoffe aber, dass Sie in Zukunft Ihren Patienten die Entscheidung überlassen.«

Ich schreite hinaus in die Sonne und verliere mich in der Menge auf den Terrassen. Ich weiß, dass Rensberg vor Schreck zittert – eine sehr menschliche Regung, zu der ich nicht mehr fähig bin. Aber das ist ein kleiner Preis, den ich gern bezahle.

Denn was mich betrifft, habe ich gelernt, dass das Leben am Ende beginnt.

nature

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 557, S. 750, 31. Mai 2018

DER AUTOR

Mike Adamson promovierte in Archäologie an der Flinders University of South Australia. Derzeit lehrt er dort Anthropologie und schreibt fantastische Erzählungen.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Frank Schubert; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Tim Kalveralge, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L)/sFr. 14,–; im Abonnement € 89,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,– im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,– ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel: 06221 9126-741

Eine Anzeigenbuchung ist auch über iq media marketing gmbH möglich.

Ansprechpartnerin Anja Väterlein: anja.vaeterlein@iqm.de

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, Tel: 06221 9126-733, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1.1. 2019.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

 ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562, Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek

Das Aprilheft ist ab 23.3. 2019 im Handel.

VORSCHAU



TIERO / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

KAUSALITÄT IN DER QUANTENWELT

Eine Kette von Ereignissen lässt sich normalerweise stets bis zum Stein des Anstoßes zurückverfolgen. Doch jetzt erzeugen Quantenphysiker bei Experimenten Situationen, in denen Ursache und Wirkung nicht mehr eindeutig sind. Die Erkenntnisse daraus könnten nicht nur Rechnungen auf Quantencomputern beschleunigen, sondern sogar wichtige Einsichten in die Schnittstelle von Quantenmechanik und Relativitätstheorie gewähren.



GABRIELE MALTINTI / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

EINER BLIEB ÜBRIG

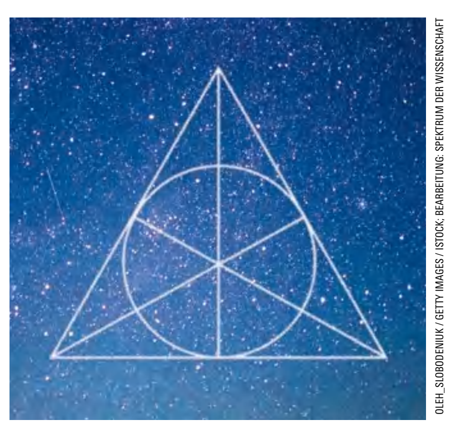
Lange lebten zahlreiche Menschenarten nebeneinander, die alle ausgestorben sind – bis auf *Homo sapiens*. Warum haben nur wir überlebt? Ein Erfolgsgeheimnis unserer Art liegt im Nachwuchs, den wir mit anderen Homininen zeugten.



MARK ROSS STUDIO / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2018

TIER ODER PFLANZE?

Mixotrophes Plankton nutzt das Sonnenlicht, jagt aber auch Lebewesen als Nahrung. Lange wurde sein Einfluss auf die Meeresökosysteme und das Klima massiv unterschätzt.



OLEH_SLOBODENIUK / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ACHT DIMENSIONEN FÜR DAS STANDARDMODELL

Die Eigenschaften fundamentaler Teilchen und Kräfte könnten von seltsamen achtdimensionalen Zahlen herrühren, den mysteriösen »Oktonionen«.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?
Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter



AUSSCHREIBUNG 2019

Der Preis wurde von der Verlagsgruppe von Holtzbrinck 1995 anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere in den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Text (Wortbeiträge Print und Online) und ein Preis in der Kategorie Elektronische Medien (TV, Hörfunk und Multimedia) sowie ein Nachwuchspreis (Jahrgang 1990 oder jünger) vergeben.

Der Preis in den Kategorien Text und Elektronische Medien ist mit je 5.000 Euro dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 Euro dotiert. Bewerben Sie sich bis zum 1. April 2019 mit 3 Beiträgen (Text) bzw. 2 – 3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter **www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis**.

KONTAKT

Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group

Taubenstraße 23, 10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20
Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de
www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Eine Shortlist mit den Nominierten wird vor der Bekanntgabe der Preisträgerinnen und Preisträger auf der Webpage veröffentlicht. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)
Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER
Mitglied des Gesellschafterausschusses,
Boehringer Ingelheim

ULRICH BLUMENTHAL
Redakteur „Forschung aktuell“, Deutschlandfunk

PROF. DR. ANTJE BOETIUS
Direktorin, Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)

PROF. DR. MARTINA BROCKMEIER
Vorsitzende, Wissenschaftsrat

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER
Präsident, Leibniz-Gemeinschaft e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER
Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG
Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER
Leiter Redaktion Wissen, DIE ZEIT und Herausgeber, ZEIT Wissen

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER
Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

RANGA YOGESHWAR
Moderator ARD-Sendungen



SPRINGER NATURE

